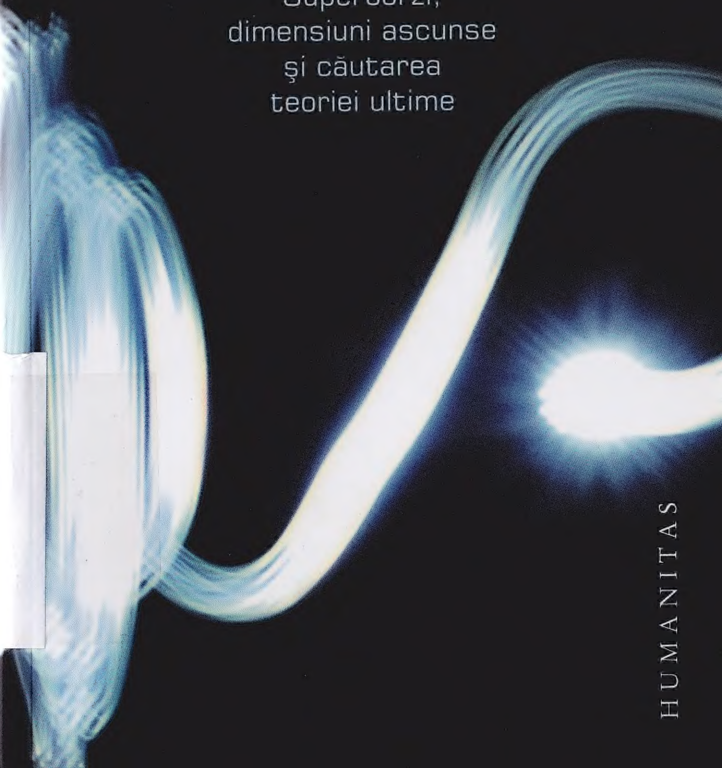
BRIAN GREENE

UNIVERSUL ELEGANT

Supercorzi, dimensiuni ascunse și căutarea teoriei ultime



HUMANITAS

Născut la New York în 1963, BRIAN GREENE a dovedit din copilărie aptitudini excepţionale pentru matematică. După studii la Harvard şi un doctorat susţinut la Oxford, a lucrat în cadrul Facultăţii de Fizică a Universităţii Cornell, iar din 1996 este profesor la Universitatea Columbia. Contribuţiile sale în domeniul teoriei corzilor şi cosmologiei îl aşază în rândul celor mai importanţi fizicieni teoreticieni ai zilelor noastre.

BRIAN GREENE

UNIVERSUL ELEGANT

Supercorzi, dimensiuni ascunse și căutarea teoriei ultime

Traducere din engleză de
DRAGOŞ ANGHEL şi
ANAMIRELA-PAULA ANGHEL



HUMANITAS
BUCUREŞTI

Coperta
IONUŢ BROŞTIANU

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
GREENE, BRIAN
Universul elegant: supercorzi, dimensiuni ascunse şi căutarea teoriei ultime / Brian Greene; trad.: Dragoş Anghel, Anamirela-Paula Anghel. – Bucureşti: Humanitas, 2008
ISBN 978-973-50-1980-8

I. Anghel, Dragoş (trad.)
II. Anghel, Anamirela (trad.

524.8

EDITURA HUMANITAS
Piaţa Presei Libere 1, 013701 Bucureşti, România
tel. 021/408 83 50, fax 021/408 83 51
www.humanitas.ro

Comenzi CARTE PRIN POŞTĂ: tel./fax 021/311 23 30
C.P.C.E. — CP 14, Bucureşti
e-mail: cpp@humanitas.ro
www.librariilehumanitas.ro

Mamei mele
și memoriei tatălui meu,
cu dragoste
și recunoștință

Prefaţa din 2003

Scriind această carte, eram conştient de faptul că numărul cititorilor ei s-ar putea să fie mic. La urma urmei e greu de închipuit că o carte despre provocările şi succesele cercetărilor moderne în privinţa celor mai profunde legi ale naturii poate fi răsfoită la plajă sau seara, înainte de culcare. O carte care abordează un subiect atât de abstract, cu intenţia de a sublinia rolul ştiinţei, nu al personalităţilor ştiinţifice, şi care nu prezintă anecdote istorice se adresează unui public şi mai redus. Dar toate acestea nu m-au descurajat, căci mi-am spus adesea (şi, evident, uşor melodramatic) că dacă reuşesc să câştig o singură persoană şi să-i dezvălui un nou spectru de idei, un nou mod de a gândi despre ea însăşi şi despre locul ei în univers, atunci mi-am atins scopul. Fie că această persoană este un tânăr student care îşi alege direcţia de studiu, un profesionist dintr-un alt domeniu, care caută ceva dincolo de rutina zilnică, sau un pensionar care, în sfârşit, îşi găseşte timpul de a citi despre progresele ştiinţei, dacă izbutesc să-l conduc spre noua viziune a universului dată de fizica modernă, atunci scrierea cărţii *Universul elegant* îşi va fi meritat efortul. Acest gând – cel puţin – m-a ajutat să trec prin perioadele mai dificile prin care trece orice autor în cursul unui proiect scriitoricesc de anvergură.

Am fost de asemenea încurajat în repetate rânduri de publicul diferitelor seminarii de interes general pe care le-am susţinut, pe teme de relativitate, de mecanică cuantică, dar şi din propriul meu domeniu de specialitate – teoria corzilor –, persoane care păreau entuziasmate de ideile ciudate şi provocatoare apărute în domeniile cele mai avansate ale cercetării ştiinţifice. Un univers în care spaţiul şi timpul sunt maleabile, un univers cu mult mai multe dimensiuni decât putem vedea, un univers în care textura spaţiului se poate rupe, un univers în care totul este compus din vibraţiile unor bucle de energie

ultramicroscopice numite corzi era un univers care îi fascina pe oameni şi pe care mulţi îşi doreau să-l cunoască mai bine. *Universul elegant* s-a înfiripat din aceste seminarii, intenţia mea fiind de a oferi şi celor fără o pregătire în matematică sau în fizică acces la toate aceste descoperiri. În ciuda faptului că agentul meu literar mi-a respins din start propunerea, motivând că acest subiect era prea ştiinţific pentru a atrage o publicare pe scară largă, din cele ce simţisem în timpul susţinerii seminariilor ştiam că entuziasmul pentru acest subiect era real. Oamenii erau cu adevărat interesaţi să afle mai mult.

Universul elegant s-a hrănit din acest entuziasm, iar răspunsul de care s-a bucurat este o confirmare a acelei tendinţe înnăscute la atât de mulţi dintre noi de a explora până la capăt, plini de curaj, universul în care trăim. De asemenea, mi-a fost întărită convingerea că fizica pune la îndemâna autorului cel mai minunat material imaginabil. Tuturor ne plac poveştile interesante. Tuturor ne place să ne lăsăm purtaţi de mister. Cu toţii admirăm progresul tenace, continuu, acolo unde aparent nu erau sorţi de izbândă. Într-un fel sau în altul, cu toţii ne dorim să descifrăm lumea din jurul nostru. Ei bine, toate aceste elemente se află în însăşi esenţa fizicii moderne. Povestea este dintre cele mai sublime – dezvăluirea întregului univers; misterele sunt dintre cele mai ascunse – dezlegarea genezei cosmosului; şansele de reuşită par a fi printre cele mai descurajante – bipezi, nou-veniţi pe scara temporară a cosmosului, încercând să afle tainele tuturor timpurilor; iar căutarea este dintre cele mai profunde – căutarea legilor fundamentale, care să explice tot ce vedem în jurul nostru şi mai departe, de la cele mai mici particule până la cele mai îndepărtate galaxii. Este greu de imaginat un punct de pornire mai fertil.

Nespecialiştii trec uneori peste diferenţa dintre limbajul intimidant pe care îl foloseşte fizica – şi care este matematica – şi ideile captivante cu care ea se confruntă. Dar a încerca să descifreze fizica în felul acesta ar fi ca şi cum ar încerca să aprecieze frumuseţea romanului *Huckleberry Finn* citindu-l în limba greacă. De exemplu eu, deşi folosesc curent alfabetul grecesc, nu cunosc deloc această limbă, aşa că impresia mea despre roman ar fi compromisă. În mod similar, când se înlătură barierele matematice, iar exprimarea conceptelor fizicii moderne se face într-un limbaj familiar tuturor, mulţi dintre cei neinteresaţi de fizică se vor trezi captivaţi. Când sunt extrase din învelişul lor tehnic, multe dintre temele fizicii moderne sunt, într-adevăr, universale.

În ultima vreme, acest lucru a devenit din ce în ce mai clar datorită prezenţei tot mai vizibile a fizicii în cultură – există un număr din ce în ce mai mare de piese de teatru, piese muzicale şi lucrări de artă inspirate de

știința modernă. Cunosc vreo douăsprezece piese de teatru recente, un cvartet de coarde, o mulțime de filme și scenarii, o operă, o serie de picturi și sculpturi care, în diferite grade, exprimă, interpretează și extind drama umană a căutării științifice. E minunat și nu este deloc surprinzător. Am fost dintotdeauna captivat de artă și literatură pentru că ele mă fac să vibrez puternic la ceea ce este important și real în viață, iar aceasta e o perspectivă împărtășită de mulți oameni pe care i-am întâlnit. Iar tocmai acesta este lucrul pe care l-au făcut majoritatea descoperirilor importante ale fizicii din ultima sută de ani. Afirmația că relativitatea și mecanica cuantică au rescris legile anterior acceptate ale realității nu reprezintă nici o exagerare, iar acum, din nou, teoria supercorzilor, chiar dacă este mai speculativă, generează o revizuire majoră a lor. Nu e de mirare deci că artiștii, scriitorii, compozitorii și producătorii de filme descoperă rezonanțe între munca lor și aceste provocări științifice actuale.

Și acesta nu este un drum cu sens unic. Integrarea descoperirilor științifice în viziunea noastră colectivă asupra lumii este un proces lent. Chiar și astăzi, după aproape un secol, majoritatea oamenilor nu au ajuns încă să aprecieze lecțiile, confirmate experimental, date de Einstein, sau lecția cuantei. Prin abordarea curajoasă a științei și prin puterea fascinației intrinseci a acesteia de a produce lucrări fascinante, cu substanță și fond dramatic, arta ar putea constitui mediul perfect de integrare totală a științei în dialogul mondial. Am putea descoperi și că lucrările de artă de inspirație științifică oferă un nou stimul imaginației științifice și, poate uneori imperceptibil, ne pregătesc pentru un nou pas în cunoașterea universului. Bineînțeles că transformarea fasciculului bine focalizat care luminează știința într-un mod pur riguros, numeric și cognitiv într-o lumină blândă, difuză, izvorâtă din sensibilitatea umană, ar putea avea o putere enormă. Când știința va fi privită ca parte integrantă a ceea ce ne definește umanitatea, propria noastră legătură cu cosmosul va fi puternic întărită; cu adevărat, știința este firul care ne țese pe toți în materia realității.

În ceea ce privește dezvoltarea teoriei supercorzilor, anii scurși de la publicarea inițială a *Universului elegant* și până în prezent au fost foarte productivi, dar revoluția gândirii pe care mulți o consideră iminentă încă nu s-a produs. Acest lucru are consecințe și bune, și rele. Partea bună este că nimic din ceea ce este prezentat în text nu e nici depășit, nici irelevant. Dacă aș scrie astăzi o carte despre teoria corzilor, aș include în ea tot materialul prezentat aici, poate cu câte o schimbare de accent ici și colo, dar rezultatul ar fi în cea mai mare parte indiscernabil de *Universul elegant*. Cele mai semnificative două schimbări pe care le-aș face ar fi adăugarea unui capitol despre ideile

noi şi interesante care sugerează că de fapt corzile şi dimensiunile spaţiale suplimentare pe care acestea le implică ar fi mult mai mari decât s-a crezut iniţial (posibilitate care se dezvăluia la vremea în care eu scriam cartea; veţi găsi referiri la aceasta în diverse note de la sfârşit) şi includerea unei discuţii despre cercetările noi şi ingenioase în legătură cu o formulare mai exactă a teoriei corzilor (aşa-numita metodă neperturbativă). Deci, atunci când veţi citi capitolele 6, 8 şi 12, nu uitaţi că de fapt corzile şi dimensiunile suplimentare s-ar putea să nu fie chiar atât de mici pe cât afirm şi că s-a făcut un progres semnificativ spre găsirea ecuaţiilor exacte ale teoriei corzilor (chiar dacă fizicienii nu au reuşit să aplice aceste ecuaţii pentru a găsi răspunsul la întrebările-cheie ridicate în aceste capitole).

Partea negativă a faptului că textul nu necesită o revizuire majoră este că multe dintre obstacolele prezentate nu au fost depăşite. Deşi dorinţa unanimă este ca progresul să fie rapid şi radical, acest lucru nu e întotdeauna posibil. Teoria supercorzilor atinge cele mai adânci probleme ale fizicii teoretice, iar majoritatea acestora sunt în afara graniţelor în care experimentul ne poate călăuzi. Câştigul ar fi enorm, căci unele dintre cele mai profunde întrebări legate de cosmos şi-ar găsi răspunsul. Progresul necesită muncă îndârjită, răbdare, noroc şi foarte multă inspiraţie – exact ingredientele a căror scară de timp în obţinerea succesului nu o putem nici controla, nici prezice.

Poate că generaţia noastră va atinge acest mult căutat nivel de cunoaştere, sau poate că nu. Poate că vor mai trece multe generaţii până atunci. Singurul lucru cert este că nu vom şti dacă nu vom încerca. Judecând după studenţii absolvenţi din ce în ce mai talentaţi care pătrund în acest domeniu, avem mulţi cercetători entuziaşti care să preia şi să continue ştafeta. În anii ce vor urma, vom încerca să dezlegăm misterele cosmosului.

Prefață

În ultimii treizeci de ani ai vieții sale, Albert Einstein s-a aflat în continua căutare a unei așa-numite teorii unificatoare a câmpului – o teorie capabilă să descrie toate forțele naturii reunite într-un singur formalism atotcuprinzător și coerent. Motivația lui Einstein nu era cea pe care o asociem în mod frecvent cu cercetările științifice, adică cea asociată încercărilor de a explica diverse date experimentale. El era mânat de convingerea pasionată că o cunoaștere cât mai profundă a universului va dezvălui cel mai minunat adevăr al său: simplitatea și forța principiilor sale de bază. Einstein dorea să lămurească funcționarea universului cu o claritate nemaiatinsă până atunci pentru a ne minuna cu toții de desăvârșita lui frumusețe și eleganță.

Einstein nu și-a împlinit niciodată acest vis, în primul rând pentru că soarta i-a fost potrivnică: în vremea lui, o mulțime de trăsături esențiale ale caracteristicilor materiei și forțelor naturii erau fie necunoscute, fie, în cel mai bun caz, prost înțelese. Dar, în cursul ultimei jumătăți de secol, fizicienii fiecărei noi generații – cunoscând multe suișuri și coborâșuri – au construit în ritm susținut, fiecare pe baza descoperirilor predecesorilor săi, și au reușit astfel să ajungă la o înțelegere din ce în ce mai cuprinzătoare a modului în care universul funcționează. Iar acum, la atât timp după ce Einstein și-a formulat obiectivul de a găsi o teorie unificatoare, obiectiv pe care nu l-a atins, fizicienii cred, în sfârșit, că au găsit o teorie în cadrul căreia pot împleti toate aceste idei pentru a crea un tot – o teorie unică, în principiu capabilă să descrie toate fenomenele. Teoria, numită *teoria supercorzilor*, este subiectul acestei cărți.

Am scris *Universul elegant* în încercarea de a face accesibile descoperirile remarcabile ale cercetării de avangardă în fizică unui spectru cât mai larg de cititori, în special acelor cititori fără vreo pregătire în domeniul matematicii

sau fizicii. În cursul prelegerilor susținute despre teoria supercorzilor în ultimii ani am fost martor al dorinței generale de a înțelege care sunt cele mai noi descoperiri privind legile fundamentale ale universului, ce restructurări radicale ale concepțiilor noastre despre univers va trebui să facem conform acestor legi și ce alte încercări ne mai așteaptă pe drumul căutării teoriei finale. Sper ca prin explicarea marilor realizări ale fizicii, întorcându-ne până la Einstein și Heisenberg, și arătând cum descoperirile lor au fost încununate prin realizările remarcabile ale epocii noastre, cartea să îmbogățească și să satisfacă această curiozitate.

Sper de asemenea ca *Universul elegant* să-i intereseze și pe cititorii cu pregătire științifică. În ceea ce-i privește pe studenții și profesorii din domeniu, sper ca această carte să reușească să cristalizeze o parte din materialul de bază al fizicii moderne, asemeni teoriei speciale a relativității, teoriei generale a relativității și mecanicii cuantice, și în același timp să redea entuziasmul contagios al cercetătorilor care se apropie continuu de mult căutata teorie unificatoare. Pentru cititorul avid de cărți de popularizare a științei, am încercat să explic progresele făcute în ultimul deceniu care au dus la o înțelegere mai bună a cosmosului. În ce-i privește pe colegii mei din alte domenii științifice, sper ca această carte să le dea o idee echilibrată și obiectivă asupra motivelor pentru care fizicienii din domeniul teoriei corzilor sunt atât de entuziaști în privința progreselor făcute în căutarea teoriei finale a naturii.

Teoria supercorzilor are implicații multiple. Este un subiect vast și profund, alimentat de descoperirile cele mai importante ale fizicii. Cum teoria unifică legile corpurilor mari și corpurilor mici, legile care guvernează fizica de la cele mai îndepărtate întinderi ale cosmosului până la cele mai mici fragmente de materie, există mai multe moduri de abordare a subiectului. Am hotărât să mă concentrez asupra evoluției înțelegerii noastre în privința spațiului și timpului. Consider că aceasta este o cale de a dezvolta subiectul deosebit de captivantă, care deschide un drum fascinant și bogat printre noile descoperiri esențiale. Einstein a arătat lumii că spațiul și timpul se comportă într-un mod cu totul neobișnuit. Acum, cercetările de avangardă au integrat descoperirile sale într-un univers cuantic cu numeroase dimensiuni ascunse, înfășurate în textura cosmosului, dimensiuni ale căror geometrii bogat împletite ar putea deține cheia răspunsurilor la cele mai profunde întrebări care s-au pus vreodată. Cu toate că multe dintre aceste concepte sunt subtile, vom vedea că ele pot fi asimilate prin analogii concrete. Iar când aceste idei vor fi înțelese, ele vor oferi o perspectivă uimitoare și revoluționară asupra universului.

Pe parcursul acestei cărți am încercat să rămân cât mai aproape de știință, furnizând în același timp cititorului o înțelegere intuitivă – de multe ori prin folosirea analogiilor și a metaforelor – privind modul în care oamenii de știință au ajuns la actualele concepții despre univers. Cu toate că am evitat limbajul de specialitate și ecuațiile, datorită noilor idei radicale, cititorul va trebui, din când în când, să se oprească și să mediteze asupra unui paragraf sau să cântărească o explicație pentru a putea înțelege pe deplin evoluția ideilor. Câteva paragrafe din partea a IV-a (care se concentrează asupra celor mai recente descoperiri) sunt puțin mai abstracte decât restul; am fost atent să avertizez cititorul asupra acestor secțiuni și am structurat textul în așa fel încât aceste secțiuni să poată fi doar răsfoite sau sărite, cu efecte minime asupra firului logic al cărții. Am inclus un glosar de termeni științifici pentru o simplă și accesibilă rememorare a ideilor prezentate în textul principal. Deși cititorul ocazional va prefera probabil să sară complet peste notele din final, cititorul mai atent va găsi în aceste note o amplificare a ideilor din text, clarificări ale ideilor simplificate în text, precum și câteva incursiuni tehnice destinate celor cu pregătire matematică.

Datorez mulțumiri multor oameni pentru sprijinul lor în timpul scrierii acestei cărți. David Steinhardt a citit manuscrisul cu mare atenție și mi-a furnizat cu generozitate idei editoriale strălucite și încurajări neprețuite. David Morrison, Ken Vineberg, Raphael Kasper, Nicolas Boles, Steven Carlip, Arthur Greenspoon, David Mermin, Michael Popowits și Shani Offen au citit atent manuscrisul și mi-au oferit reacții și sugestii care au ridicat mult nivelul prezentării. Dintre cei care au mai citit manuscrisul sau părți ale sale și mi-au oferit sfaturi sau încurajări se mai numără Paul Aspinwall, Persis Drell, Michael Duff, Kurt Gottfried, Joshua Green, Teddy Jefferson, Marc Kamionkowski, Yakov Kanter, Andras Kovacs, David Lee, Megan McEwen, Nari Mistry, Hasan Padamsee, Ronen Plesser, Massimo Poratti, Fred Sherry, Lars Straeter, Steven Strogatz, Andrew Strominger, Henry Tye, Cumrun Vafa și Gabriele Veneziano. Îi mulțumesc în special lui Raphael Gunner, printre multe altele pentru criticile pline de înțelepciune care, în stadiile de început ale redactării manuscrisului, m-au ajutat să găsesc forma de ansamblu pe care o are cartea acum, și lui Robert Maley pentru încurajările sale blânde, dar persistente de a depăși stadiul în care doar mă gândeam la carte și de a pune efectiv creionul pe hârtie. Steven Weinberg și Sidney Coleman mi-au oferit sfaturi și ajutoare foarte prețioase și îmi face plăcere să amintesc numeroasele interacții folositoare pe care le-am avut cu Carol Archer, Vicky Carstens, David Cassel, Anne Coyle, Michael Duncan, Jane Forman, Wendy Green, Susan Green, Erik Jendresen, Gary Kass,

Shiva Kumar, Robert Mawhinney, Pam Morehouse, Pierre Ramond, Amanda Salles şi Eero Simoncelli. Îi sunt îndatorat lui Costas Efthimiou pentru ajutorul dat la verificarea celor relatate şi la găsirea referinţelor necesare şi pentru transformarea schiţelor mele iniţiale în desene după care Tom Rockwell a creat – cu o răbdare de înger şi cu un deosebit simţ artistic – figurile care ilustrează textul. Le mulţumesc lui Andrew Hanson şi Jim Sethna pentru pregătirea unora dintre figurile mai complicate.

Pentru faptul că au consimţit să-mi răspundă la întrebări şi mi-au împărtăşit opiniile lor personale asupra diverselor subiecte abordate în carte, le mulţumesc lui Howard Georgi, Sheldon Glashow, Michael Green, John Schwarz, John Wheeler, Edward Witten şi, din nou, lui Andrew Strominger, Cumrun Vafa şi Gabriele Veneziano.

Mă bucur să amintesc observaţiile pătrunzătoare şi sugestiile nepreţuite ale Angelei Von der Lippe, precum şi ascuţitul simţ pentru detaliu al lui Tracy Nagle, editorii mei de la W.W. Norton, care au îmbunătăţit seminficativ claritatea prezentării. Mulţumesc de asemenea agenţilor mei literari, John Brockman şi Katinka Matson, pentru sfaturile lor competente în păstorirea acestei cărţi, de la concepere şi până la publicare.

Pentru sprijinul generos acordat cercetărilor mele în fizica teoretică, pe o durată mai lungă de un deceniu şi jumătate, sunt recunoscător Fundaţiei Naţionale pentru Ştiinţă, Fundaţiei Alfred P. Sloan şi Departamentului Statelor Unite pentru Energie. Probabil că nu este surprinzător că propria mea cercetare s-a concentrat pe impactul teoriei supercorzilor asupra concepţiei noastre despre spaţiu şi timp, iar în două capitole spre final prezint unele dintre descoperirile la care am avut norocul să iau parte. Deşi sper ca cititorul să fie atras de aceste relatări „de la faţa locului", îmi dau seama că ele pot crea o impresie exagerată privind rolul pe care l-am avut eu în dezvoltarea teoriei supercorzilor. Profit deci de această ocazie pentru a le mulţumi celor mai bine de o mie de fizicieni de pe mapamond care participă în mod hotărâtor şi cu mult aplomb la elaborarea acestei teorii finale a universului. Cer iertare tuturor celor care nu-şi regăsesc cercetările în această carte; ea reflectă doar perspectiva tematică pe care am ales-o şi este numai o prezentare generală.

Şi, în sfârşit, îi mulţumesc din inimă lui Ellen Archer pentru dragostea şi sprijinul ei neîncetat, fără de care această carte nu ar fi fost scrisă.

Partea I
La limita cunoașterii

Capitolul 1

Înfășurat în corzi

S-o numim conspirație a tăcerii ar fi mult prea dramatic. Dar timp de mai bine de o jumătate de secol – chiar în toiul unora dintre cele mai mari realizări științifice din istorie – pe tăcute, fizicienii erau conștienți de amenințarea norului întunecat care se ivea la orizont. Problema este următoarea: există doi piloni fundamentali pe care se bazează fizica modernă. Unul este teoria generală a relativității a lui Einstein, care oferă cadrul teoretic de înțelegere a universului la cea mai mare scară de dimensiuni: stele, galaxii, roiuri de galaxii și dincolo de ele, în imensitatea întregului univers. Celălalt este mecanica cuantică, care oferă cadrul teoretic de înțelegere a universului la scara cea mai mică: de la molecule, atomi, până la particulele subatomice, cum ar fi electronii și cuarcii. În cursul multor ani de cercetări, fizicienii au confirmat experimental, cu o precizie inimaginabilă, practic toate predicțiile făcute de fiecare dintre aceste teorii. Însă aceste sisteme teoretice duc inexorabil la o concluzie tulburătoare: în actuala lor formulare, teoria generală a relativității și mecanica cuantică *nu pot fi amândouă corecte.* Cele două teorii care stau la baza progresului fantastic făcut de fizică în ultima sută de ani – progres datorită căruia s-a explicat expansiunea universului și structura fundamentală a materiei – sunt reciproc incompatibile.

Dacă nu ați mai auzit până acum despre acest antagonism feroce, vă veți întreba de ce. Răspunsul nu e greu de dat. În afara situațiilor extreme, fizicienii studiază obiecte care sunt fie mici și ușoare (ca atomii și constituenții lor), fie enorme și grele (ca stelele și galaxiile), dar nu pe amândouă. Aceasta înseamnă că ei au nevoie *fie* numai de mecanica cuantică, *fie* numai de teoria generală a relativității, așa că

pot ignora, după o privire fugară, nepotrivirea alarmantă dintre ele. Acest mod de abordare al ultimilor cincizeci de ani poate fi considerat destul de apropiat de ignoranță.

Universul însă *se poate* afla în condiții extreme. În centrul găurilor negre, o masă enormă este strivită până la o dimensiune minusculă. În momentul marii explozii, întregul univers a erupt dintr-un grăunte microscopic a cărui dimensiune face ca firul de nisip să pară colosal. Acestea sunt domenii minuscule, și totuși incredibil de masive, în care mecanica cuantică și teoria generală a relativității trebuie să coexiste. Din motive care vor deveni din ce în ce mai clare pe măsură ce avansăm, atunci când se combină ecuațiile teoriei generale a relativității cu cele ale mecanicii cuantice, acestea încep să se scuture, să se zgâlțâie și să pufăie ca un automobil turat la maximum. Cu alte cuvinte, întrebări fizice bine puse primesc răspunsuri fără sens din amalgamul nefericit al acestor două teorii. Chiar dacă vrem să păstrăm misterul asupra adâncurilor găurilor negre sau asupra începuturilor universului, nu putem ignora sentimentul că ostilitatea existentă între mecanica cuantică și teoria generală a relativității cere un nivel de înțelegere mai profund. E cu putință ca universul să fie divizat la cel mai profund nivel, necesitând un anumit set de legi pentru obiectele mari și un cu totul alt set pentru obiectele mici?

Teoria supercorzilor, o nou-venită în comparație cu venerabilele edificii reprezentate de mecanica cuantică și teoria generală a relativității, ne răspunde printr-un „nu" hotărât. Intensele cercetări din ultimul deceniu întreprinse de fizicienii și matematicienii din toată lumea au dovedit că această nouă abordare care descrie materia până la cel mai profund nivel rezolvă tensiunile existente între teoria generală a relativității și mecanica cuantică. De fapt, teoria supercorzilor ne demonstrează și mai multe: în acest nou cadru, relativitatea generală și mecanica cuantică *au nevoie una de cealaltă* pentru ca teoria să aibă sens. Conform teoriei supercorzilor, acest mariaj dintre legile corpurilor mari și legile corpurilor mici nu e numai fericit, ci și inevitabil.

Acestea sunt doar o parte dintre veștile bune. Teoria supercorzilor – mai pe scurt, teoria corzilor – duce această uniune cu un pas imens mai departe. Timp de treizeci de ani, Einstein a căutat o teorie unificatoare care să întrețească toate legile naturii și constituenții ei materiali, formând o singură tapiserie teoretică. A eșuat însă. Acum, în zorii noului mileniu, adepții teoriei corzilor pretind că firele acestei

tapiserii insesizabile au fost, în sfârşit, găsite. Teoria corzilor poate arăta că toate lucrurile minunate care se petrec în univers – de la dansul frenetic al cuarcilor subatomici până la valsul maiestuos al rotirii pe orbită a stelelor binare, de la bulgărele de foc primordial al marii explozii până la impunătoarea rotaţie a galaxiilor cereşti – toate sunt reflecţii ale unui singur principiu fizic măreţ, ale unei singure ecuaţii supreme.

Deoarece aceste caracteristici ale teoriei corzilor necesită schimbarea radicală a concepţiilor noastre despre spaţiu, timp şi materie, ne va trebui un timp pentru a ne obişnui cu ele, pentru a ajunge la un nivel confortabil de înţelegere. Dar aşa cum va deveni de altfel clar în contextul adecvat, teoria corzilor apare ca o consecinţă spectaculoasă şi totuşi naturală, provocată de descoperirile revoluţionare ale fizicii din ultima sută de ani. Vom vedea că acest conflict dintre teoria generală a relativităţii şi mecanica cuantică nu este de fapt primul, ci al treilea dintr-un şir de conflicte majore prin care a trecut fizica în ultima sută de ani, iar rezolvarea fiecăruia dintre ele a condus la o schimbare radicală a modului nostru de a privi universul.

Cele trei conflicte

Primul conflict, recunoscut ca atare încă de la sfârşitul secolului XIX, se referă la proprietăţile ciudate ale mişcării luminii. Pe scurt, conform legilor de mişcare ale lui Newton, dacă alergi suficient de repede, poţi prinde din urmă o rază de lumină, în timp ce legile electromagnetismului ale lui James Clerk Maxwell ne spun că acest lucru nu e posibil. Aşa cum vom vedea în capitolul 2, Einstein a rezolvat acest conflict prin teoria specială a relativităţii, iar astfel a modificat radical concepţiile noastre despre spaţiu şi timp. Conform teoriei speciale a relativităţii, spaţiul şi timpul nu mai pot fi privite ca nişte concepte universale imuabile, pe care le percepem cu toţii în acelaşi mod. Din transformarea săvârşită de Einstein, spaţiul şi timpul apar ca nişte constructe maleabile a căror formă depinde de starea de mişcare a observatorului.

Dezvoltarea teoriei speciale a relativităţii a pregătit imediat terenul pentru cel de-al doilea conflict. Una din concluziile lucrărilor lui Einstein este că nici un obiect – de fapt nici o influenţă sau perturbaţie de orice fel – nu se poate deplasa mai repede decât viteza luminii.

Însă, aşa cum vom vedea în capitolul 3, teoria universală a gravitației a lui Newton, foarte bine verificată experimental şi atrăgătoare din punct de vedere intuitiv, implică influențe care se transmit *instantaneu* la distanțe enorme. Tot Einstein a fost cel care a rezolvat şi acest conflict, în 1915, oferind o nouă concepție asupra gravitației prin teoria generală a relativității. Aşa cum teoria specială a relativității a răsturnat concepțiile anterioare asupra spațiului şi timpului, la fel s-a întâmplat şi în cazul teoriei generale a relativității. Nu numai că spațiul şi timpul sunt influențate de starea de mişcare a observatorului, dar ele se pot şi deforma şi curba ca răspuns la prezența materiei sau energiei. După cum vom vedea, aceste distorsiuni ale texturii spațiului şi timpului transmit forța gravitațională dintr-un loc într-altul. Deci spațiul şi timpul nu mai pot fi privite ca un fundal inert pe care se desfăşoară evenimentele universului; din perspectiva teoriilor specială şi generală a relativității, acestea devin participanți intimi la evenimente.

Istoria s-a mai repetat o dată: descoperirea teoriei generale a relativității a rezolvat un conflict şi a generat un altul. De-a lungul a trei decenii, începând din 1900, fizicienii au elaborat mecanica cuantică (despre care vom vorbi în capitolul 4) în urma numeroaselor probleme evidente apărute la aplicarea concepțiilor fizicii secolului XIX asupra fenomenelor din lumea microscopică. Şi, aşa cum am menționat mai sus, al treilea şi cel mai profund conflict apare din incompatibilitatea dintre mecanica cuantică şi teoria generală a relativității. După cum se va vedea în capitolul 5, forma geometrică uşor curbată a spațiului rezultat din teoria generală a relativității este în dezacord cu frenezia haotică a universului microscopic descris de mecanica cuantică. Cum abia pe la mijlocul anilor 1980 teoria corzilor a oferit o soluție, conflictul a fost pe drept cuvânt numit problema centrală a fizicii moderne. În plus, întemeindu-se pe teoria generală şi teoria specială a relativității, teoria corzilor necesită o altă revizuire drastică a concepțiilor noastre despre spațiu şi timp. De exemplu, cei mai mulți dintre noi luăm drept evident faptul că universul nostru are trei dimensiuni spațiale. Acest lucru nu e însă adevărat conform teoriei corzilor, care susține că universul nostru are mult mai multe dimensiuni decât ni se pare nouă – dimensiuni care sunt strâns înfăşurate în faldurile texturii cosmosului. Acest mod remarcabil de a privi spațiul şi timpul este atât de important, încât îl vom folosi ca temă călăuzitoare în cele ce

urmează. Teoria corzilor este într-adevăr povestea spaţiului şi timpului de la Einstein încoace.

Pentru a înţelege ce este de fapt teoria corzilor, va trebui să facem un pas înapoi şi să prezentăm pe scurt ce am aflat de-a lungul ultimului secol despre structura microscopică a universului.

Universul la scara cea mai mică: ce ştim despre materie

Vechii greci au presupus că toate lucrurile din univers sunt compuse din ingrediente minuscule „indivizibile", pe care le-au numit *atomi*. Aşa cum numărul enorm de cuvinte dintr-o limbă alfabetică e alcătuit din combinaţii ale unui număr mai mic de litere, ei s-au gândit că gama largă de obiecte materiale ar putea de asemenea rezulta din combinaţii ale unui număr mic de constituenţi elementari distincţi. Aceasta a fost o adevărată profeţie. După mai bine de 2000 de ani, noi încă o considerăm adevărată, cu toate că identitatea unităţilor fundamentale a cunoscut multe revizuiri. În secolul XIX, oamenii de ştiinţă au demonstrat că multe dintre substanţele familiare, precum oxigenul şi carbonul, au un cel mai mic constituent identificabil; urmând tradiţia instituită de greci, ei au numit aceşti constituenţi *atomi*. Numele le-a rămas, deşi istoria a demonstrat că termenul a fost greşit atribuit, deoarece atomii pot fi „tăiaţi". La începutul anilor 1930, eforturile colective ale lui J.J. Thomson, Ernest Rutherford, Niels Bohr şi James Chadwick au dus la modelul planetar al atomului (atomul sub forma unui sistem solar), cu care majoritatea dintre noi suntem acum familiarizaţi. Departe de a fi cel mai simplu constituent material, atomul e alcătuit dintr-un nucleu, care conţine protoni şi neutroni, înconjurat de un roi de electroni care orbitează în jurul lui.

O vreme, mulţi fizicieni au crezut că protonii, electronii şi neutronii sunt „atomii" grecilor. Dar, în 1968, experimentatorii de la Centrul Acceleratorului Liniar de la Stanford, folosindu-se de capacitatea sporită a tehnologiei de a sonda adâncimile microscopice ale materiei, au descoperit că nici protonii şi nici neutronii nu sunt fundamentali. Ei au arătat că fiecare dintre aceştia constau din câte trei particule mai mici numite *cuarci* – nume fantezist, împrumutat dintr-un pasaj

din romanul *Finnegan's Wake* a lui James Joyce de către fizicianul teoretician Murray Gell-Mann, cel care prezisese existența lor. Experimentatorii au confirmat că există două tipuri de cuarci, numiți cu mult mai puțină fantezie „*up*" (sus) și „*down*" (jos). Un proton este constituit din doi cuarci up şi un cuarc down, iar un neutron, din doi cuarci down și un cuarc up.

Tot ce se vede pe Pământ și pe cerul de deasupra noastră pare să fie alcătuit din combinații de electroni, cuarci up și cuarci down. Nu există nici o dovadă experimentală că aceste particule ar fi compuse din ceva mai mic. Pe de altă parte, există o mulțime de dovezi că universul conține mai multe tipuri de particule. Pe la mijlocul anilor '50, Frederick Reines și Clyde Cowan au obținut dovezi experimentale concludente privind existența unei a patra particule fundamentale, numită *neutrin* – o particulă a cărei existență fusese prezisă încă de la începutul anilor 1930 de Wolfgang Pauli. Neutrinii s-au dovedit a fi foarte greu de găsit, deoarece sunt particule fantomatice care interacționează foarte rar cu altă materie: un neutrin de energie medie poate trece cu uşurință prin multe milioane de milioane de mile de plumb, fără să-i fie afectată în vreun fel mişcarea. Exact în acest moment, în timp ce citiți această carte, miliarde de neutrini emişi în spațiu de Soare trec prin corpul vostru şi prin Pământ în lunga lor călătorie singuratică prin cosmos. La sfârşitul anilor 1930, fizicienii care studiau razele cosmice (jeturi de particule venite din spațiu şi care bombardează Pământul) au descoperit particula numită *miuon* – identică cu electronul, dar având o masă de 200 de ori mai mare. Datorită faptului că la vremea aceea în ordinea cosmică nu exista nimic care să necesite existența miuonului – nici o dilemă nerezolvată, nici o nişă în construcțiile teoretice –, fizicianul Isidor Isaac Rabi, laureat al premiului Nobel, a salutat descoperirea miuonului cu un „Cine a comandat asta?" total lipsit de entuziasm. Totuşi, miuonul exista şi multe urmau să se întâmple.

Folosind tehnologii din ce în ce mai avansate, fizicienii au continuat să izbească una de alta bucăți de materie, la energii din ce în ce mai înalte, recreând pentru scurt timp condiții nemaiîntâlnite de la marea explozie. Au căutat apoi printre schije noi ingredienți fundamentali, pentru a-i adăuga la lista particulelor aflată în continuă creştere. Iată ce au descoperit: încă patru cuarci – *charm* (farmec), *strange* (straniu), *bottom* (bază) şi *top* (vârf) – şi o altă rudă, şi mai grea, a electronului, numită *tau*, împreună cu alte două particule cu proprietăți

similare neutrinului (numite *neutrinul miuonic* şi *neutrinul taonic*, pentru a le deosebi de neutrinul iniţial care acum se numeşte *neutrinul electronic*). Aceste particule sunt produse prin ciocniri la energie înaltă, dar existenţa lor este efemeră; ele nu sunt printre constituenţii tipici ai nici unui element întâlnit în mod obişnuit. Dar nici acesta nu e sfârşitul poveştii. Fiecare dintre aceste particule are un partener *antiparticula* – o particulă de masă identică, dar având unele proprietăţi opuse, de exemplu sarcina electrică (sau sarcinile corespunzătoare altor tipuri de forţe, prezentate mai jos). De exemplu antiparticula unui electron se numeşte *pozitron* – are exact aceeaşi masă ca electronul, însă sarcina lui electrică este +1, în timp ce sarcina electrică a electronului este –1. Atunci când vin în contact, materia şi antimateria se pot anihila reciproc, producând energie pură – de aceea în lumea înconjurătoare antimateria apare extrem de rar.

Fizicienii au identificat o schemă căreia i se supun aceste particule, prezentată în tabelul 1.1. Particulele de materie se încadrează cu

Familia 1		**Familia 2**		**Familia 3**	
Particula	**Masa**	**Particula**	**Masa**	**Particula**	**Masa**
Electron	0,00054	Miuon	0,11	Tau	1,9
Neutrinul electronic	$<10^{-8}$	Neutrinul miuonic	<0,0003	Neutrinul taonic	<0,033
Cuarcul up	0,0047	Cuarcul charm	1,6	Cuarcul top	189
Cuarcul down	0,0074	Cuarcul strange	0,16	Cuarcul bottom	5,2

Tabelul 1.1 Cele trei familii de particule fundamentale şi masele lor (unitatea de masă este masa protonului). Valorile maselor neutrinilor nu au putut fi încă determinate experimental.*

* După apariţia cărţii s-a descoperit experimental că neutrinii au masă, iar determinarea acestor mase face acum obiectul unor intense investigaţii experimentale. (*N. red.*)

precizie în trei grupări, numite în general *familii*. Fiecare familie conține doi dintre cuarci, un electron sau o rudă a lui și una din speciile de neutrini. Tipurile de particule corespunzătoare fiecăreia dintre cele trei familii au proprietăți identice, cu excepția masei, care crește de la o familie la alta. Rezultatul este că acum fizicienii au sondat structura materiei până la scări de ordinul unei miliardimi dintr-o miliardime de metru și au arătat că *tot* ce s-a întâlnit până acum – indiferent dacă există în mod natural sau este produs artificial cu ajutorul gigantelor acceleratoare de particule – constă dintr-o combinație a particulelor din aceste trei familii și din partenerii lor antimaterie.

O privire asupra tabelului 1.1 ne va face, fără îndoială, să înțelegem consternarea lui Rabi la descoperirea miuonului. Aranjarea pe familii ne dă o oarcare senzație de ordine, însă imediat apar o mulțime de întrebări. De ce sunt atât de multe particule fundamentale, în ciuda faptului că majoritatea lucrurilor din jurul nostru necesită doar electroni, cuarci up și cuarci down? De ce sunt trei familii? De ce nu este o singură familie sau patru familii sau orice alt număr? De ce masele particulelor par să fie luate la întâmplare – de ce, de exemplu, tau cântărește cam de 3 520 de ori mai mult decât electronul? De ce cuarcul top cântărește cam de 40 200 de ori mai mult decât cuarcul up? Acestea sunt numere care par stranii și aleatoare. Au apărut ele oare din întâmplare, datorită unei alegeri divine, ori există o explicație științifică pe înțelesul nostru a acestor caracteristici fundamentale ale universului?

Forțele sau unde este fotonul?

Lucrurile se complică și mai tare atunci când luăm în considerare și forțele din natură. Lumea din jurul nostru este plină de modalități de exercitare a influențelor: mingile pot fi lovite cu bâte, amatorii de *bungee* se aruncă spre pământ de pe platforme înalte, magneții pot susține trenuri foarte rapide suspendate deasupra șinelor metalice, contoarele Geiger pot ticăi ca răspuns la prezența unui material radioactiv, bombe nucleare pot exploda. Avem capacitatea de a influența obiectele împingându-le, trăgându-le sau scuturându-le; aruncând sau trăgând în ele cu alte obiecte; întinzându-le, răsucindu-le sau strivindu-le; ori înghețându-le, încălzindu-le sau arzându-le. În cursul ultimei sute de ani, fizicienii au adunat dovezi peste dovezi că toate aceste

interacţii dintre diverse obiecte şi materiale, precum şi alte milioane şi milioane de alte interacţii posibile întâlnite zilnic pot fi reduse la o combinaţie de patru forţe fundamentale. Una dintre ele este *forta gravitaţională*. Celelalte trei sunt *forţa electromagnetică, forţa slabă* şi *forţa tare.*

Gravitația este cea mai familiară dintre forțe, fiind răspunzătoare de păstrarea Pământului pe orbită în jurul Soarelui şi de menținerea noastră cu picioarele ferm lipite de Pământ. Masa unui obiect măsoară forţa gravitaţională pe care acesta o poate simţi şi exercita. Forța electromagnetică este a doua dintre forțele cu care suntem obişnuiți. Ea este cea care ne aduce toate înlesnirile vieții moderne – lumina, calculatorul, televizorul, telefoanele –, ea se află în spatele puterii uluitoare a fulgerului şi te face să simţi o uşoară atingere de mână. Din punct de vedere microscopic, sarcina electrică a unei particule joacă acelaşi rol pentru forţa electromagnetică ca şi masa pentru forţa gravitaţională: ea determină capacitatea particulelor de a exercita sau de a răspunde la interacţia electromagnetică.

Forțele slabe și cele tari ne sunt mai puțin familiare, pentru că tăria lor scade rapid când este depăşită scara subatomică; ele sunt forțele nucleare. Acesta este motivul pentru care aceste forţe au fost doar de curând descoperite. Forța tare este cea care ține cuarcii strâns „lipiți" în interiorul protonilor și neutronilor și menține protonii și neutronii „înghesuiți" în interiorul nucleelor atomice. Forţa slabă este în general cunoscută ca fiind responsabilă pentru descompunerea radioactivă a unor substanţe, cum ar fi uraniul şi cobaltul.

În ultima sută de ani, fizicienii au descoperit două caracteristici comune tuturor acestor forțe. În primul rând, așa cum vom vedea și în capitolul 5, la nivel microscopic, tuturor acestor forţe li se asociază câte o particulă, pe care o putem considera ca fiind cel mai mic pachet de forță. Dacă trageți cu o rază laser – un „pistol cu raze electromagnetice" –, atunci declanşaţi un şuvoi de *fotoni*, care sunt cele mai mici pachete de forță electromagnetică. În mod similar, cei mai mici constituenți ai câmpurilor de forțe slabă și tare sunt particulele numite *bosonii de etalonare slab* şi *gluonii.* (Numele de gluon este foarte plastic: ne putem gândi la gluoni ca la ingredientele microscopice ale lipiciului puternic care ţine legate nucleele atomice.)* Până în

* *Glue* în engleză înseamnă lipici. (*N. red.*)

1984, experimentatorii stabiliseră definitiv existența și proprietățile detaliate ale acestor trei tipuri de particule de forță, prezentate în tabelul 1.2. Fizicienii consideră că și forța gravitațională are o particulă asociată, gravitonul, însă existența lui nu a fost confirmată experimental până acum.

A doua caracteristică comună celor patru tipuri de forțe este aceea că, așa cum masa unei particule determină modul în care ea este afectată de gravitație și cum sarcina ei electrică determină cât de mult interacționează electromagnetic, particulele sunt înzestrate cu anumite cantități de „sarcină tare" sau de „sarcină slabă," care determină modul în care sunt afectate de forțele tari și slabe. (Aceste proprietăți sunt expuse mai detaliat în tabelul din notele de la sfârșitul cărții.[1]) Dar, ca și în cazul maselor particulelor, dincolo de faptul că experimentatorii au măsurat cu atenție aceste proprietăți, nimeni nu a putut explica *de ce* universul nostru este compus anume din aceste particule, cu aceste valori ale maselor și sarcinilor de forță.

În ciuda caracteristicilor comune, o examinare a forțelor fundamentale servește doar la formularea întrebărilor. De ce, de exemplu, există patru forțe fundamentale? De ce nu cinci, nu trei sau poate chiar numai una? De ce forțele au proprietăți atât de diferite? De ce forțele tari și slabe sunt constrânse să acționeze doar la scara microscopică, în timp ce gravitația și forța electromagnetică au o rază nelimitată de influență? Și de ce există asemenea diferențe enorme între tăriile intrinseci ale acestor forțe?

Pentru a înțelege semnificația acestei ultime întrebări, imaginați-vă că țineți un electron în mâna stângă și un alt electron în mâna

Forța	**Particula de forță**	**Masa**
Tare	Gluon	0
Electromagnetică	Foton	0
Slabă	Bosoni de etalonare slabi	86, 97
Gravitațională	Graviton	0

Tabelul 1.2 Cele patru forțe din natură împreună cu particulele de forță asociate și cu masele acestora, exprimate în unități egale cu masa protonului. (Există mai multe varietăți de particule de forță slabă, valorile posibile ale maselor lor fiind cele două din tabel. Studii teoretice arată că gravitonul ar trebui să aibă masa zero.)

dreaptă şi că apropiaţi aceste două particule identice încărcate electric până la o distanţă foarte mică. Atracţia gravitaţională reciprocă va favoriza apropierea, în timp ce respingerea electromagnetică va încerca să le îndepărteze. Care este mai puternică? Nu se compară: respingerea electromagnetică este de aproximativ un milion de miliard de miliard de miliard de miliard de ori (10^{42}) mai puternică! Dacă bicepsul dumneavoastră drept reprezintă tăria forţei gravitaţionale, atunci bicepsul stâng ar trebui să se extindă dincolo de marginile universului cunoscut pentru a reprezenta tăria forţei electromagnetice. Singurul motiv pentru care forţa electromagnetică nu copleşeşte total gravitaţia în lumea din jurul nostru este că majoritatea obiectelor sunt compuse din cantităţi egale de sarcină electrică pozitivă şi negativă, iar forţele acestora se anulează reciproc. Pe de altă parte, cum gravitaţia este întotdeauna atractivă, nu există anulări analoge – mai multă materie înseamnă o forţă gravitaţională mai mare. Însă, din punct de vedere fundamental, gravitaţia este o forţă extrem de slabă. (Acesta este motivul pentru care e atât de greu de confirmat experimental existenţa gravitonului. Căutarea celui mai mic pachet al forţei celei mai slabe este o provocare uriaşă.) Experimentele au mai arătat că forţa tare este cam de o sută de ori mai puternică decât forţa electromagnetică şi de o sută de mii de ori mai puternică decât forţa slabă. Dar care este raţiunea – aşa-numita *raison d'être* – pentru care universul nostru are aceste caracteristici?

Nu este o întrebare născută dintr-o filozofare sterilă despre motivul pentru care anumite detalii se întâmplă să fie într-un fel şi nu în altul; universul ar fi cu totul diferit dacă proprietăţile particulelor de materie şi de forţă ar fi doar uşor modificate. De exemplu, existenţa nucleelor stabile care alcătuiesc cele o sută şi ceva de elemente ale tabelului periodic depind critic de raportul dintre puterea forţei tari şi cea a forţei electromagnetice. Protonii înghesuiţi în nucleele atomice se resping electromagnetic unul pe altul; din fericire, forţa tare care acţionează asupra cuarcilor constituenţi anihilează această respingere şi menţine protonii strâns legaţi. Dar o schimbare relativ de mică în tăria relativă a acestor două forţe ar perturba echilibrul existent şi ar face ca majoritatea nucleelor atomice să se dezintegreze. Mai mult, dacă masa electronului ar fi doar de câteva ori mai mare decât este în realitate, electronii şi protonii s-ar combina formând neutroni, devorând nucleele de hidrogen (cel mai simplu element din cosmos, al cărui nucleu constă dintr-un singur proton) şi împiedicând astfel formarea elementelor mai complexe. Stelele se bazează pe fuziunea nucleelor stabile,

așa că nu s-ar mai putea forma în cazul unor asemenea modificări în fizica fundamentală. Tăria forței gravitaționale joacă și ea un rol. Zdrobitoarea densitate a materiei din miezul unei stele alimentează furnalul nuclear al acesteia și dă naștere orbitoarei lumini stelare. Dacă tăria forței gravitaționale ar crește, bulgărele stelar s-ar strânge mai mult, producând o creștere semnificativă a ratei reacțiilor nucleare. Dar, la fel cum o flăcără strălucitoare își epuizează combustibilul mai rapid decât o lumânare care arde încet, o creștere a ratei reacțiilor nucleare ar face ca stele precum Soarele să ardă mult mai rapid, iar acest lucru ar avea un efect devastator asupra apariției vieții, așa cum o cunoaștem noi. Pe de altă parte, dacă tăria forței gravitaționale ar scădea semnificativ, materia nu s-ar mai lega, iar formarea stelelor, planetelor și galaxiilor nu ar mai putea avea loc.

Am putea continua, dar ideea e clară: universul este așa cum este pentru că particulele de materie și de forță au proprietățile pe care le au. Dar oare se poate explica științific *de ce* au ele aceste proprietăți?

Teoria corzilor: ideea de bază

Teoria corzilor oferă o puternică paradigmă conceptuală din care a apărut pentru prima oară un cadru în care să se poată răspunde la aceste întrebări. Să vedem mai întâi care este ideea de bază.

Particulele din tabelul 1.1 sunt „literele" întregii materii. Asemenea corespondentelor lingvistice, ele par să nu mai aibă structură internă. Teoria corzilor susține contrariul. Conform teoriei corzilor, dacă am putea examina aceste particule cu o precizie și mai mare – o precizie care ar depăși cu multe ordine de mărime capacitățile tehnologice actuale –, am observa că particulele nu sunt punctiforme, ci constau dintr-o minusculă *buclă* unidimensională. Asemeni unei benzi elastice infinit de subțiri, fiecare particulă conține un filament care dansează, oscilează și vibrează și pe care fizicienii, lipsiți de flerul literar al lui Gell-Man, l-au numit *coardă*. În figura 1.1 ilustrăm această idee esențială a teoriei corzilor pornind de la o bucată de materie obișnuită, un măr, a cărei structură o mărim succesiv pentru a-i dezvălui ingredientele la scări din ce în ce mai mici. Teoria corzilor adaugă noul nivel microscopic al buclelor vibrante progresiei cunoscute anterior, care trecea de la atomi la protoni, neutroni, electroni și cuarci.[2]

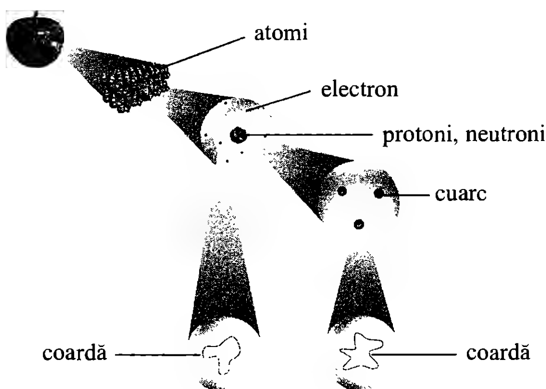


Figura 1.1 Materia este compusă din atomi care, la rândul lor, sunt alcătuiţi din cuarci şi electroni. Conform teoriei corzilor, toate aceste particule sunt de fapt bucle minuscule de corzi vibrante.

Deşi nu este deloc evident, vom vedea în capitolul 6 că această simplă transformare a constituenţilor materiali din particule punctiforme în corzi rezolvă incompatibilitatea dintre mecanica cuantică şi teoria generală a relativităţii. În felul acesta, teoria corzilor desface nodul gordian al fizicii teoretice contemporane. Este o realizare fantastică, însă nu constituie decât o parte din motivul pentru care teoria corzilor a generat atât de mult entuziasm.

Teoria corzilor – teoria unificată despre tot

Pe vremea lui Einstein nu se descoperiseră încă forţa tare şi forţa slabă, însă el considera chiar şi existenţa a două forţe distincte – gravitaţia şi electromagnetismul – profund tulburătoare. Einstein nu putea să accepte că natura se bazează pe un plan atât de extravagant. Această idee a lansat călătoria lui de 30 de ani în căutarea aşa-numitei *teorii de câmp unificatoare* prin care spera să demonstreze că aceste două forţe sunt de fapt manifestări ale unui mare principiu fundamental. Această căutare vizionară l-a izolat pe Einstein de curentul central al fizicii care, aşa cum este de înţeles, era mai interesat să exploreze noul formalism al mecanicii cuantice. La începutul anilor 1940, Einstein

i-a scris unui prieten: „Am devenit un bătrân singuratic, cunoscut mai ales pentru că nu poartă ciorapi şi care este prezentat la ocazii speciale ca o ciudăţenie."[3]

Einstein era pur şi simplu înaintea timpului său. O jumătate de secol mai târziu, visul unei teorii unificatoare a devenit Sfântul Graal al fizicii moderne. În plus, o parte din ce în ce mai mulţi fizicieni şi matematicieni sunt tot mai convinşi că teoria corzilor ar putea fi răspunsul căutat. Pornind de la un singur principiu – şi anume că orice lucru, la nivelul său cel mai mic, este constituit din combinaţii de corzi vibrante – teoria corzilor oferă un cadru explicativ unic capabil să cuprindă toate forţele şi toată materia.

Teoria corzilor susţine, de exemplu, că proprietăţile observate ale particulelor, adică datele din tabelele 1.1 şi 1.2, ar fi o reflexie a diferitelor moduri în care o coardă poate vibra. Aşa cum corzile unei viori sau ale unui pian au frecvenţe de rezonanţă la care preferă să vibreze – modurile de vibraţie pe care urechea noastră le percepe ca diverse note muzicale şi armonicele lor mai înalte – la fel se întâmplă şi cu buclele din teoria corzilor. Dar vom vedea că, în loc să producă note muzicale, fiecare mod de vibraţie al unei corzi se manifestă ca o particulă a cărei masă şi sarcină de forţă sunt determinate de modul de oscilaţie a corzii. Electronul este o coardă care vibrează într-un fel, cuarcul up vibrează în alt fel şi aşa mai departe. Departe de a fi o colecţie de date experimentale, proprietăţile particulelor din teoria corzilor sunt o manifestare a uneia şi aceleiaşi trăsături fizice: modurile rezonante de vibraţie – să le numim muzică – ale buclelor fundamentale ale corzilor. Aceeaşi idee se aplică şi forţelor naturii. Vom vedea că particulele de forţă sunt şi ele asociate cu nişte moduri de vibraţie particulare ale corzii, şi deci totul, toată materia şi toate forţele, e unificat în acelaşi registru al oscilaţiilor microscopice ale corzilor – al „notelor" pe care corzile le pot produce.

Pentru prima dată în istoria fizicii avem deci un cadru în care putem explica fiecare trăsătură fundamentală pe care se bazează construcţia universului. Din acest motiv, teoria corzilor este uneori prezentată ca o posibilă „teorie despre tot" (*theory of everything* – T.O.E.), ca teoria „ultimă" sau ca teoria „finală". Aceşti termeni măreţi au menirea să desemneze cea mai profundă teorie fizică – o teorie care stă la baza tuturor celorlalte, una care nu necesită şi nici nu permite o bază explicativă mai profundă. În practică, mulţi dintre teoreticienii care lucrează

în teoria corzilor abordează o perspectivă mai pragmatică şi se gândesc la T.O.E. într-un sens mai limitat ca la o teorie care poate explica proprietăţile particulelor fundamentale şi proprietăţile forţelor prin care acestea interacţionează şi prin care se influenţează una pe alta. Un reducţionist convins ar pretinde că acest mod de abordare nu reprezintă o limitare şi că în principiu orice, de la marea explozie până la închipuirile noastre, poate fi descris prin procese fizice microscopice între constituenţii fundamentali ai materiei. Reducţionistul susţine că, dacă înţelegem totul despre ingredienţi, înţelegem absolut orice.

Filozofia reducţionistă declanşează dezbateri aprinse. Multora li se pare stupid şi de-a dreptul respingător să pretinzi că minunile vieţii şi ale universului sunt numai reflecţii ale dansului fără rost al particulelor microscopice, a cărui coregrafie este dirijată de legile fizicii. Oare într-adevăr sentimentele de bucurie, tristeţe sau plictiseală să fie doar nişte reacţii chimice ale creierului, reacţii între molecule şi atomi care, la o privire mai atentă, sunt de fapt reacţii între particulele din tabelul 1.1 care reprezintă chiar corzile vibrante? Pentru a răspunde acestei critici, laureatul premiului Nobel Steven Weinberg ne avertizează în *Vise despre o teorie finală* (*Dreams of a final theory*):

> La celălalt capăt al spectrului se află oponenţii reducţionismului care sunt îngroziţi de ceea ce ei consideră a fi întunecarea ştiinţelor moderne. Indiferent în ce măsură vor putea fi reduşi, ei şi lumea lor, la o materie de particule sau de câmpuri şi la interacţiile dintre acestea, ei se vor simţi diminuaţi de această realizare[...] Nu voi încerca să răspund acestor critici printr-un discurs entuziast despre frumuseţile ştiinţei moderne. Punctul de vedere reducţionist *este* rece şi impersonal. Trebuie să-l acceptăm aşa cum este, nu pentru că ne place, ci pentru că aşa este lumea.[4]

Unii sunt de acord cu acest punct de vedere tranşant, alţii nu.

Unii au încercat să susţină că domenii recent dezvoltate, cum ar fi teoria haosului, ne arată că apar noi tipuri de legi atunci când nivelul de complexitate a sistemului creşte. Una este să înţelegi comportarea unui electron sau a unui cuarc, şi cu totul altceva e să foloseşti aceste cunoştinte pentru a înţelege comportarea unei tornade. Cei mai mulţi sunt de acord asupra acestui punct de vedere. Opiniile diverg însă

atunci când se pune problema dacă fenomenele diverse, şi în general neaşteptate, care se produc în sisteme mai complexe decât cele reprezentate de particulele individuale reflectă într-adevăr acţiunea unor noi principii fizice sau principiile implicate sunt derivate, deşi într-un mod teribil de complicat, din principiile fizice ce guvernează numărul enorm de constituenţi elementari. Părerea mea este că acestea nu reprezintă legi noi, independente, ale fizicii. Cu toate că ar fi greu să explicăm proprietăţile unei tornade în termenii fizicii electronilor şi cuarcilor, eu văd această problemă doar ca pe un impas de calcul, iar nu ca pe un indiciu al necesităţii unor noi legi fizice. Dar, din nou, există unii care nu sunt de acord cu această perspectivă.

Ceea ce este indubitabil, şi de primă importanţă pentru călătoria pe care o vom întreprinde în această carte, este faptul că teoria e una, iar practica e cu totul altceva, chiar şi atunci când acceptăm raţionamentul discutabil al unui reducţionist rigid. Aproape toată lumea este de acord cu faptul că găsirea T.O.E. nu înseamnă că psihologia, biologia, geologia, chimia sau chiar fizica au fost pe deplin înţelese ori în vreun fel subsumate. Universul este atât de bogat şi de complex, încât descoperirea teoriei finale, în sensul prezentat aici, nu va însemna sfârşitul ştiinţei. Dimpotrivă: descoperirea T.O.E. – explicaţia ultimă a universului la cel mai simplu nivel al său, o teorie care nu se bazează pe o înţelegere mai profundă – va furniza cea mai fermă bază de la care să *pornească* descifrarea lumii. Descoperirea ei va marca un început, nu un sfârşit. Teoria finală va constitui pilonul de nezdruncinat a cărui coerenţă ne va asigura întotdeauna că universul poate fi înţeles.

Stadiul în care se găseşte teoria corzilor

Scopul principal al acestei cărţi este de a explica modul în care funcţionează universul conform teoriei corzilor, punând în prim-plan implicaţiile pe care aceasta o are asupra felului în care percepem spaţiul şi timpul. Spre deosebire de alte expuneri ale descoperirilor ştiinţifice, cea de faţă nu se referă la o teorie complet lămurită, confirmată de experimente riguroase şi general acceptată de comunitatea ştiinţifică. Şi asta pentru că, aşa cum vom vedea în capitolele următoare, teoria corzilor este o structură teoretică atât de profundă şi de sofisticată, încât,

chiar şi cu progresele impresionante din ultimii douăzeci de ani, mai avem încă de parcurs un drum lung până să ajungem s-o stăpânim complet.

Aşadar, teoria corzilor trebuie privită ca o teorie în dezvoltare, a cărei finalizare parţială a dus deja la dezvăluiri uimitoare despre natura spaţiului, timpului şi materiei. Îmbinarea armonioasă dintre teoria generală a relativităţii şi mecanica cuantică e un succes major. În plus, spre deosebire de orice altă teorie anterioară, teoria corzilor poate răspunde la întrebările primordiale referitoare la cei mai simpli constituenţi şi forţele fundamentale din natură. De aceeaşi importanţă, însă ceva mai greu de expus, este eleganţa remarcabilă pe care teoria corzilor o conferă atât răspunsurilor, cât şi cadrului în care se obţin aceste răspunsuri. De exemplu, în teoria corzilor, multe aspecte ale naturii care par să fie detalii tehnice arbitrare – cum ar fi numărul de particule fundamentale distincte şi proprietăţile acestora – sunt derivate din aspecte esenţiale şi tangibile ale geometriei universului. Dacă teoria corzilor este corectă, textura microscopică a universului nostru este un labirint multidimensional bogat întreţesut, în care corzile universului se răsucesc şi vibrează fără încetare, bătând tactul legilor cosmosului. Departe de a fi nişte detalii accidentale, proprietăţile elementelor fundamentale ale naturii sunt profund împletite în textura spaţiului şi a timpului.

La analiza finală însă, nimic nu poate înlocui predicţiile bine definite şi testabile care să determine dacă teoria corzilor a reuşit să ridice cu adevărat vălul care acoperea cele mai profunde adevăruri universale. S-ar putea să mai treacă destul de mult timp până când nivelul nostru de cunoaştere va atinge profunzimea necesară realizării acestui scop, dar, aşa cum vom vedea în capitolul 9, s-ar putea ca unele teste experimentale să ofere un sprijin indirect destul de puternic teoriei corzilor în următorii zece ani. În plus, în capitolul 13, vom vedea că teoria corzilor a rezolvat de curând enigma principală a găurilor negre, asociată cu aşa-numita entropie Bekenstein-Hawking, care rezistase cu încăpăţânare oricărei rezolvări prin mijloace mai convenţionale timp de peste 25 de ani. Acest succes i-a convins pe mulţi că teoria corzilor este în curs de a ne oferi cea mai profundă înţelegere a principiilor de bază ale universului.

Edward Witten, unul dintre pionierii şi specialiştii de frunte ai teoriei corzilor, rezumă situaţia spunând că „teoria corzilor este o parte

a fizicii secolului XXI, dar care a nimerit întâmplător în secolul XX", afirmaţie făcută de fapt pentru prima data de celebrul fizician italian Daniele Amati[5]. Într-un fel, este ca şi cum înaintaşilor noştri de la sfârşitul secolului XIX li s-ar fi oferit un supercalculator al zilelor noastre, însă fără manualul de utilizare. Printr-un proces ingenios de încercări succesive, ar fi putut căpăta o idee despre puterea supercalculatorului, însă ar fi fost nevoie de un efort intens şi prelungit pentru a-l folosi la întreaga capacitate. Ideea despre puterea supercalculatorului, la fel ca intuiţiile noastre legate de puterea explicativă a teoriei corzilor, i-ar fi îndemnat să pună complet stăpânire pe el. O motivaţie asemănătoare impulsionează astăzi o întreagă generaţie de fizicieni teoreticieni pentru a ajunge la înţelegerea analitică precisă şi deplină a teoriei corzilor.

Afirmaţiile lui Witten şi ale celorlalţi specialişti din domeniu ne sugerează că ar putea trece zeci sau chiar sute de ani până când teoria corzilor să fie pe deplin elaborată şi înţeleasă. De fapt, matematica teoriei corzilor este atât de complicată, încât până acum nimeni nu cunoaşte nici măcar ecuaţiile exacte ale teoriei. Fizicienii cunosc doar aproximaţii ale acestor ecuaţii, dar chiar şi aceste ecuaţii aproximative sunt atât de complicate, încât, până în momentul de faţă, au fost numai parţial rezolvate. Totuşi, un număr de descoperiri inspirate făcute la sfârşitul anilor 1990 – descoperiri ce au răspuns unor întrebări teoretice de o inimaginabilă dificultate – ar putea arăta faptul că înţelegerea cantitativă completă a teoriei corzilor este mult mai aproape decât s-a crezut iniţial. Fizicienii din toată lumea elaborează tehnici noi şi puternice pentru a depăşi numeroasele metode aproximative folosite până acum, punând la locul ei, printr-un efort colectiv şi într-un ritm ameţitor, piesă după piesă în puzzle-ul teoriei corzilor.

În mod surprinzător, aceste progrese oferă noi modalităţi fertile de reinterpretare ale unor aspecte de bază ale teoriei care fuseseră deja stabilite. De exemplu, o întrebare firească ce s-ar naşte privind figura 1.1 ar fi: de ce corzi? De ce nu discuri micuţe? Sau picături microscopice? Sau o combinaţie a tuturor acestor posibilităţi? Aşa cum vom vedea în capitolul 12, cele mai recente descoperiri arată că alte tipuri de ingrediente joacă *într-adevăr* un rol important în cadrul teoriei corzilor şi demonstrează că teoria corzilor face parte de fapt dintr-un ansamblu mai vast, numit în mod curent (şi misterios) teoria M. Aceste progrese de ultimă oră vor face subiectul capitolului final al cărţii.

În ştiinţă, progresul are loc în salturi. Unele perioade sunt pline de mari descoperiri, altele de eforturi eşuate. Savanţii prezintă rezultatele, atât teoretice, cât şi experimentale. Rezultatele sunt dezbătute de comunitatea ştiinţifică şi uneori sunt respinse, alteori modificate, dar câteodată oferă adevărate trambuline pentru noi căi mai precise de înţelegere a universului fizic. Cu alte cuvinte, ştiinţa progresează pe un drum în zig-zag spre ceea ce sperăm să fie adevărul ultim; un drum care porneşte de la cele mai timpurii încercări ale omenirii de a explica cosmosul, dar al cărui final nu poate fi anticipat. Nu putem şti dacă teoria corzilor este o haltă întâmplătoare pe parcursul acestei călătorii, un punct de răscruce sau chiar destinaţia ei finală. Însă ultimii douăzeci de ani de cercetări întreprinse de sute de fizicieni şi matematicieni pasionaţi din diverse ţări ne îndreptăţesc să sperăm că suntem pe calea cea bună şi probabil pe cea din urmă pistă.

Dovada naturii bogate şi profunde a teoriei corzilor este că ne-a permis, chiar şi cu actualul nivel de înţelegere, să ajungem la noi perspective uimitoare asupra tainelor universului. Firul central al celor ce vor urma va fi constituit de acele progrese care împing şi mai departe revoluţia produsă în înţelegerea spaţiului şi timpului odată cu enunţarea de către Einstein a teoriei speciale şi a teoriei generale a relativităţii. Se va vedea că, dacă teoria corzilor este corectă, textura universului nostru are proprietăţi care l-ar fi uluit chiar şi pe Einstein.

Partea a II-a

Dilema spațiului, timpului și cuantelor

CAPITOLUL 2

Spațiul, timpul și ochiul observatorului

În iunie 1905, la 26 de ani, Albert Einstein a trimis spre publicare revistei germane *Annalen der Physik* un articol matematic în care rezolva un paradox legat de lumină, care îl preocupase vreme de zece ani, încă din adolescență. După ce a întors și ultima pagină a manuscrisului, editorul de atunci al revistei, Max Planck, a înțeles că ordinea științifică unanim acceptată tocmai fusese zdruncinată din temelii. Fără surle și trâmbițe, un funcționar de la biroul de brevete și invenții din Berna aruncase în aer noțiunile tradiționale de spațiu și timp și le înlocuise cu noi concepte ale căror proprietăți contrazic flagrant experiența noastră cotidiană.

Paradoxul care îl neliniștise pe Einstein timp de un deceniu era următorul: pe la mijlocul anilor 1800, după un studiu atent al experimentelor fizicianului englez Michael Faraday, fizicianul scoțian James Clerk Maxwell a reușit să unifice electricitatea și magnetismul în cadrul formalismului câmpului electromagnetic. Dacă ai fost vreodată pe vârful unui munte înaintea unei furtuni foarte puternice, cu tunete și fulgere, sau ai stat lângă un generator Van de Graaf, atunci într-adevăr ai simțit *pe propria piele* ce înseamnă câmpul electromagnetic. Dacă nu, atunci îți poți imagina niște valuri de linii de forță electrică și magnetică umplând spațiul pe care îl străbat. De exemplu, când împrăștii pilitură de fier lângă un magnet, modelul ordonat pe care îl formează aceasta pune în evidență o parte din liniile invizibile de forță magnetică. Dacă într-o zi deosebit de uscată îți scoți puloverul de lână, auzi niște pocnituri slabe și chiar simți unul ori două mici șocuri, atunci ești martorul manifestării liniilor de forță generate de sarcinile electrice din fibrele puloverului tău. Pe lângă faptul că a unificat aceste fenomene electrice și magnetice, și multe altele, într-un singur cadru matematic,

teoria lui Maxwell a arătat – într-un mod surprinzător – că perturbațiile electromagnetice se propagă cu o viteză fixă care nu se schimbă niciodată și care se dovedește a fi egală cu viteza luminii. De aici Maxwell a tras concluzia că lumina vizibilă nu e decât un anumit tip de undă electromagnetică, iar acum știm despre aceasta că, interacționând cu substanțele chimice din retina ochiului, dă senzația de vedere. Mai mult, teoria lui Maxwell a arătat că toate undele electromagnetice, inclusiv lumina vizibilă, sunt întruparea călătorului neobosit: nu se opresc niciodată; nu încetinesc niciodată. Lumina se mișcă *întotdeauna* cu viteza luminii.

Toate bune și frumoase până ne întrebăm, așa cum s-a întrebat Einstein la șaisprezece ani, ce se întâmplă dacă alergăm după o rază de lumină cu viteza luminii? O judecată intuitivă, bazată pe legile mișcării enunțate de Newton, ne spune că vom ajunge din urmă raza de lumină, care ne va părea atunci staționară; lumina va rămâne nemișcată. Dar, conform teoriei lui Maxwell și a tuturor observațiilor relevante științific, nu există lumină staționară; nimeni nu a ținut vreodată o bucată de lumină în palmă. De aici s-a ivit contradicția. Din fericire, Einstein nu știa că mulți dintre fizicienii de marcă ai lumii se luptau cu această problemă (și urmau multe piste greșite), așa că a putut să rumege singur și pe îndelete paradoxul creat de Maxwell și Newton.

În acest capitol vom vedea cum a rezolvat Einstein conflictul prin teoria specială a relativității, schimbând totodată concepția noastră despre spațiu și timp. Poate părea surprinzător faptul că principalul scop al teoriei speciale a relativității este înțelegrea corectă a modului în care lumea apare unor persoane – numite în general „observatori" – care sunt în mișcare relativă una față de alta. La prima vedere ar putea părea un exercițiu intelectual insignifiant. Einstein însă a făcut ca imaginarea acestor situații în care observatorii aleargă după raze de lumină să capete implicații profunde pentru înțelegerea completă a modului în care cele mai obișnuite situații apar indivizilor aflați în mișcare relativă.

Intuiția și erorile ei

Experiența obișnuită scoate în evidență deosebiri între observațiile făcute de asemenea persoane. De exemplu, copacii aflați de-a lungul unei șosele par să se miște când sunt priviți de șofer, dar sunt nemișcați

pentru autostopistul de pe marginea drumului. La fel, bordul unui automobil nu pare să se mişte din punctul de vedere al şoferului (cel puţin aşa sperăm!), dar se mişcă împreună cu întreaga maşină faţă de autostopist. Aceste proprietăţi elementare ale mişcării sunt atât de intuitive, încât nici măcar nu le mai observăm.

Teoria specială a relativităţii susţine însă că diferenţele dintre observaţiile acestor indivizi sunt mult mai profunde şi mai subtile. Teoria afirmă că observatorii aflaţi în mişcare relativă vor avea percepţii diferite asupra spaţiului şi timpului. Aşa cum vom vedea mai târziu, aceasta înseamnă că ceasuri identice, purtate de doi indivizi care se mişcă unul faţă de celălalt, vor ticăi cu frecvenţe diferite şi deci vor arăta durate de timp diferite între aceleaşi evenimente. Teoria specială a relativităţii demonstrează că prin această afirmaţie nu contestăm precizia ceasurilor folosite în experiment, ci facem de fapt o afirmaţie despre timpul însuşi.

În mod asemănător, observatori aflaţi în mişcare unul faţă de altul, având cu ei rigle identice, nu vor cădea niciodată de acord asupra distanţelor măsurate. Din nou, aceasta nu se datorează lipsei de acurateţe a instrumentelor de măsurat sau erorilor de măsurare. Cele mai precise mijloace de măsurare din lume confirmă faptul că spaţiul şi timpul – măsurate prin distanţă şi durată – nu sunt percepute în mod identic de toată lumea. Teoria specială a relativităţii rezolvă contradicţia dintre percepţia noastră asupra mişcării şi proprietăţile luminii, dar acest lucru se face plătind un preţ: observaţiile asupra spaţiului şi timpului, făcute de persoane aflate în mişcare una faţă de alta, nu vor coincide.

A trecut aproape un secol de când Einstein a făcut cunoscute lumii descoperirile sale, şi totuşi cei mai mulţi dintre noi vedem spaţiul şi timpul în termeni absoluţi. Teoria specială a relativităţii nu ne-a intrat în sânge – nu o simţim. Implicaţiile ei nu sunt uşor de intuit pentru noi. Motivul e foarte simplu: efectele relativităţii speciale depind de cât de repede ne mişcăm, iar la vitezele maşinilor, avioanelor sau chiar ale navelor spaţiale aceste efecte sunt minuscule. Există diferenţe în percepţia spaţiului şi timpului între persoanele rămase în repaus faţă de pământ şi cele călătorind în maşini sau avioane, dar ele trec întotdeauna neobservate. Însă, dacă cineva ar putea călători într-un vehicul futuristic la o viteză comparabilă cu viteza luminii, efectele relativiste ar deveni evidente. Bineînţeles, acest lucru este deocamdată de

domeniul ştiinţifico-fantasticului. Dar, aşa cum vom vedea în capitolele următoare, experimente ingenioase au permis observarea clară şi precisă a proprietăţilor relative ale spaţiului şi timpului prezise de teoria lui Einstein.

Pentru a ne da mai bine seama de scara mărimilor implicate, să ne imaginăm că ne aflăm în anul 1970 şi că au apărut maşinile mari şi rapide. Slim, care tocmai şi-a cheltuit toate economiile pe un Trans Am nou, se duce împreună cu fratele său Jim la pista de încercări pentru a supune maşina unui test pe care orice comerciant i l-ar fi interzis. După ce ambalează bine motorul, Slim străbate fâşia de asfalt lungă de o milă cu viteza de 120 de mile* pe oră, Jim stă pe margine şi îl cronometrează. Dorind şi o altă confirmare, Slim utilizează şi el un cronometru pentru a măsura timpul în care noua sa maşină străbate pista. Înainte de teoria lui Einstein nimeni nu s-ar fi îndoit că, dacă Slim şi Jim au ceasuri bune, fiecare va indica acelaşi timp scurs. Dar, în conformitate cu teoria specială a relativităţii, Jim va măsura un timp de 30 de secunde, iar cronometrul lui Slim va înregistra un timp de 29,99999999999952 secunde – ceva mai puţin deci. Bineînţeles că această diferenţă este atât de mică, încât ar putea fi detectata doar prin măsurători de o precizie care depăşeşte cu mult posibilităţile unui cronometru de mână, ale sistemelor olimpice de cronometrare sau chiar şi ale celor mai perfecţionate ceasuri atomice. Nu este deci de mirare că din experienţa noastră cotidiană nu reiese faptul că trecerea timpului depinde de starea de mişcare.

Un dezacord similar apare şi la măsurarea lungimilor. De exemplu, într-un alt test de viteză, Jim foloseşte o metodă ingenioasă de a măsura lungimea noii maşini a lui Slim: el porneşte cronometrul exact când partea din faţă a maşinii ajunge în dreptul lui şi îl opreşte exact când spatele maşinii îl depăşeşte. Cum Jim ştie că Slim merge cu 120 de mile pe oră, el poate calcula lungimea maşinii înmulţind această viteză cu timpul măsurat de cronometrul său. Din nou, înainte de teoria lui Einstein, nimeni nu s-ar fi îndoit că lungimea pe care Jim o măsoară în acest mod indirect nu ar fi exact aceea pe care Slim a măsurat-o când maşina era în repaus în salonul de prezentare. Teoria specială a relativităţii pretinde că, dimpotrivă, dacă Slim şi Jim fac măsurători precise, iar dacă Slim află de exemplu că maşina are 16 picioare,

* O milă reprezintă aproximativ 1,6 km, iar un picior, 30 cm. (*N. red.*)

atunci Jim va obține 15,99999999999974 picioare – deci ceva mai puțin. La fel ca în cazul măsurării timpului, diferența e atât de mică, încât instrumentele obișnuite nu au precizia necesară pentru a o detecta.

Cu toate că diferențele sunt extrem de mici, ele evidențiază o eroare gravă în concepția generală asupra universalității și imuabilității spațiului și timpului. Pe măsură ce viteza relativă a unor persoane precum Jim și Slim crește, eroarea devine tot mai limpede. Pentru a obține diferențe observabile, vitezele implicate trebuie să fie o fracțiune destul de mare din viteza maxim posibilă – viteza luminii – pe care atât teoria lui Maxwell, cât și măsurătorile o găsesc a fi în jur de 186 000 mile pe secundă sau 670 de milioane de mile pe oră. Această viteză e suficient de mare pentru a înconjura Pământul de mai mult de 7 ori într-o secundă. Dacă Slim, de exemplu, ar conduce nu cu 120 mile pe oră, ci cu 580 milioane de mile pe oră (ceea ce înseamnă aproximativ 87% din viteza luminii), teoria specială a relativității prezice că Jim va măsura o lungime a mașinii de 8 picioare, ceea ce reprezintă o mare diferență față de măsurătorile lui Slim (și de specificațiile din cartea tehnică a mașinii). În mod asemănător, timpul de parcurgere a pistei de încercări măsurat de Jim va fi aproape de două ori mai lung decât timpul măsurat de Slim.

Cum asemenea viteze enorme sunt mult peste posibilitățile tehnicii actuale, efectele „dilatării timpului" și „contracției Lorentz" – așa cum sunt numite aceste fenomene în literatura științifică – sunt extrem de mici în viața de zi cu zi. Dacă însă am trăi într-o lume în care obiectele se deplasează în mod obișnuit cu viteze apropiate de viteza luminii, am simți atât de des aceste proprietăți ale spațiului și timpului, încât ele ni s-ar părea la fel de intuitive ca mișcarea aparentă a copacilor de pe marginea drumului despre care am vorbit la începutul acestui capitol. Dar cum nu trăim într-o astfel de lume, aceste caracteristici nu ne sunt familiare. Așa cum vom vedea, înțelegerea și acceptarea lor necesită schimbarea radicală a viziunii noastre asupra lumii.

Principiul relativității

Există două structuri simple și totuși profunde ce formează baza teoriei speciale a relativității. Așa cum am menționat, una se referă la proprietățile luminii; vom discuta despre ea mai pe larg în secțiunea

următoare. Cealaltă e mai abstractă. Ea nu se referă la o lege fizică anume, ci la toate legile fizicii şi e cunoscută sub numele de *principiul relativităţii*. Principiul relativităţii se bazează pe un fapt simplu: de câte ori vorbim despre viteză trebuie să specificăm precis cine şi cu ce face măsurătorile. Pentru a înţelege mai uşor sensul şi importanţa acestei afirmaţii, să considerăm situaţia următoare.

Să ne imaginăm că George, îmbrăcat într-un costum de cosmonaut şi având o sursă de lumină roşie intermitentă, pluteşte în întunericul absolut al spaţiului vid, departe de orice planete, stele sau galaxii. Din punctul lui de vedere, George se află în repaus, în mijlocul întunericului nemişcat al cosmosului. În depărtare, George observă o luminiţă verde, care clipeşte şi pare că se tot apropie. Când ajunge suficient de aproape, George observă că lumina provine de la costumul unui alt călător spaţial, Gracie, care trece încet pe lângă el. Ea îi face semn cu mâna, George o salută şi el, după care Gracie se pierde în depărtare. Aceeaşi poveste poate fi spusă însă şi din perspectiva lui Gracie, cu egală îndreptăţire. Povestea începe cu Gracie singură în imensitatea întunecată a spaţiului cosmic. În departare, Gracie zăreşte o lumină roşie care clipeşte şi pare să se apropie. Când în sfârşit ajunge suficient de aproape, Gracie observă că luminiţa provine de la un alt costum, iar în acel costum se află George, care trece încet pe lângă ea. El îi face semn cu mâna, îl salută şi Gracie, după care George se pierde în depărtare.

Cele două poveşti descriu una şi aceeaşi situaţie din două puncte de vedere diferite, dar la fel de îndreptăţite. Fiecare din cei doi observatori simte că este în repaus şi îl percepe pe celălalt ca fiind în mişcare. Amândouă perspectivele sunt de înţeles şi sunt perfect justificate. Cum există o simetrie între cei doi călători spaţiali, nu se poate spune cu temei că una din perspective este „corectă“, iar cealaltă „incorectă“. Fiecare are aceleaşi motive să considere că punctul lui de vedere este cel adevărat.

Acest exemplu surprinde esenţa principiului relativităţii: conceptul de mişcare este relativ. Putem vorbi despre mişcarea unui obiect, însă numai relativ la, sau în comparaţie, cu altul. Prin urmare, afirmaţia „George merge cu 10 mile pe oră“ nu are nici un sens atât timp cât nu se specifică un alt obiect de referinţă. Pe de altă parte, afirmaţia „George trece pe lângă Gracie cu 10 mile pe oră“ are un sens clar, pentru că acum am specificat-o pe Gracie ca reper. Mai mult, aşa cum arată exemplul nostru, această ultimă afirmaţie este echivalentă cu

afirmaţia „Gracie trece pe lângă George cu 10 mile pe oră (în direcţie opusă)". Cu alte cuvinte, nu există o noţiune „absolută" de mişcare. Mişcarea este relativă.

Un element-cheie în toată această poveste este că nici George şi nici Gracie nu sunt traşi sau împinşi, nu acţionează asupra lor vreo forţă sau vreo influenţă care ar putea să-i perturbe din starea liniştită de imponderabilitate în care se deplasează cu viteză constantă. Astfel, o afirmaţie mai precisă este că mişcarea în absenţa forţelor are sens doar prin comparaţie cu alte obiecte, luate ca reper. Această clarificare este importantă pentru că, dacă sunt implicate forţe, ele produc schimbări ale vitezelor observatorilor – ale vitezelor şi/sau ale direcţiilor de mişcare –, schimbări care pot fi simţite. De exemplu, dacă George ar fi fost propulsat de un mic motor cu reacţie fixat pe spatele costumului, atunci cu siguranţă că ar fi simţit că se mişcă. Această senzaţie e intrinsecă. Dacă propulsorul funcţionează, George *ştie* că se mişcă chiar dacă e cu ochii închişi şi nu se poate raporta la alte obiecte. Chiar şi fără aceste comparaţii, el nu ar mai pretinde că stă în timp ce „restul lumii trece pe lângă el". Mişcarea cu viteză constantă este relativă; nu se poate spune însă acelaşi lucru despre mişcarea neuniformă, numită şi mişcare accelerată. (Vom reexamina această afirmaţie în capitolul următor, când vom discuta mişcarea accelerată şi teoria generală a relativitaţii a lui Einstein).

Plasarea acestor poveşti în spaţiul vid şi întunecat ne ajută să înţelegem mai bine principiile, datorită înlăturării lucrurilor familiare precum străzile şi clădirile, pe care în mod normal, dar nejustificat, le considerăm „staţionare". În orice caz, acelaşi principiu se aplică şi situaţiilor de pe Pământ şi, de fapt, e un lucru pe care îl simţim frecvent[6]. De exemplu imaginează-ţi că după ce ai adormit în tren te trezeşti tocmai când trenul tău trece pe lângă un altul, care merge pe o şină învecinată, paralelă. Având vederea obturată de celălalt tren, fiind deci împiedicat să vezi orice alte obiecte, pentru o vreme s-ar putea să nu-ţi dai seama dacă trenul tău, celălalt tren sau ambele trenuri se mişcă. Bineînţeles că dacă trenul tău se zguduie, se clatină sau îşi schimbă direcţia urmând o curbă, atunci simţi că te mişti. Dar dacă mişcarea este perfect uniformă – dacă viteza trenului rămâne constantă – vei putea observa numai mişcarea relativă a trenurilor, fără să poţi preciza care din ele se mişcă.

Să facem un pas mai departe. Imaginează-ţi că eşti într-un astfel de tren şi că tragi jaluzelele, aşa încât ferestrele să fie complet acoperite.

Fără posibilitatea de a vedea ceva în afara compartimentului tău și presupunând că trenul se mișcă cu viteză absolut constantă, nu vei putea în nici un fel determina în ce stare de mișcare te afli. Compartimentul și tot ce este în el vor arăta și se vor comporta *exact* la fel, indiferent dacă trenul stă nemișcat pe șine sau se mișcă cu viteză mare. Einstein a formulat această idee – idee enunțată de fapt pentru prima oară de Galilei – afirmând că este imposibil pentru tine sau pentru orice alt călător să facă vreun experiment în acel compartiment închis prin care să determine dacă trenul se mișcă sau nu. Aceasta surprinde din nou principiul relativității: cum orice mișcare în care nu sunt implicate forțe este relativă, ea are sens doar prin comparație cu alte obiecte sau indivizi aflați de asemenea în mișcare în absența forțelor. Este imposibil să faci vreo precizare asupra stării tale de mișcare fără să faci referire, direct sau indirect, la obiecte „exterioare“. Pur și simplu nu există noțiunea de mișcare „absolută“ cu viteză constantă; doar comparațiile pot avea un sens fizic.

De fapt, Einstein a înțeles că principiul relativității presupune ceva și mai important: legile fizicii – oricare ar fi ele – trebuie să fie absolut identice pentru toți observatorii aflați în mișcare cu viteză constantă. Prin urmare, dacă George și Gracie nu ar pluti pur și simplu prin spațiu, ci fiecare ar face același set de experimente în stația lui spațială, rezultatele pe care le-ar obține ar fi identice. Și acum fiecare din ei este perfect îndreptățit să creadă că stația lui spațială se află în repaus, deși cele două stații sunt în mișcare relativă. Dacă tot echipamentul lor este identic, între cele două situații experimentale nu există nici o deosebire – ele sunt perfect simetrice. Legile fizice pe care fiecare le va deduce din experimente vor fi de asemenea identice. Nici ei și nici experimentele lor nu pot simți – în sensul că nu vor fi influențate de – mișcarea cu viteză constantă. Această idee simplă stabilește simetria totală între asemenea observatori; acest concept este încorporat în principiul relativității. Vom vedea în curând efectul profund al acestui principiu.

Viteza luminii

Al doilea ingredient-cheie în relativitatea specială este legat de lumină și de proprietățile mișcării ei. Spre deosebire de cele susținute până acum, și anume că o propoziție de genul „George merge cu 10 mile

pe oră“ nu are nici un sens fără a preciza şi sistemul la care ne referim pentru comparaţie, s-a demonstrat, după aproape un secol de eforturi din partea fizicienilor experimentatori, că pentru toţi observatorii viteza luminii este de 670 milioane de mile pe oră, *indiferent de sistemul de referinţă ales pentru comparaţie.*

Acceptarea acestui fapt a necesitat o revoluţie în modul nostru de a privi universul. Să încercăm să înţelegem sensul acestei afirmaţii mai întâi comparând-o cu afirmaţii similare, legate de obiecte comune. Imaginează-ţi că este o zi frumoasă şi însorită, aşa că te duci să te joci cu mingea cu o prietenă. Pentru o vreme, amândoi aruncaţi mingea lejer de la unul la altul, cu o viteză de, să zicem, 20 de picioare pe secundă, când deodată se porneşte o furtună neaşteptată cu fulgere şi trăsnete care vă face pe amândoi s-o luaţi la fugă să vă adăpostiţi. După ce trece furtuna, vă întoarceţi să continuaţi jocul, dar observi că ceva s-a schimbat. Părul prietenei este acum ciufulit şi ţepos, iar în privirea ei cruntă e un licăr de nebunie. Când te uiţi la mâna ei, observi cu stupefacţie că nu mai ţine o minge, ci e pe cale să arunce spre tine cu o grenadă. Evident, entuziasmul tău pentru joc scade brusc; o iei la goană! Când prietena aruncă grenada, ea va zbura spre tine, dar, pentru că fugi, viteza cu care se apropie grenada va fi mai mică de 20 picioare pe secundă. De fapt, experienţa de zi cu zi ne arată că dacă fugi cu, să zicem, 12 picioare pe secundă, atunci grenada se va apropia cu (20 – 12 =) 8 picioare pe secundă. Un alt exemplu: dacă eşti la munte şi o avalanşă de zăpadă se prăvăleşte spre tine, reacţia va fi să te întorci şi să fugi, pentru ca astfel viteza cu care zăpada se apropie de tine să scadă – ceea ce în general e un lucru bun. Din nou, pentru cineva care stă pe loc, viteza zăpezii care se apropie este mai mare decât pentru cel care fuge din faţa ei.

Acum să comparăm aceste observaţii simple referitoare la jocul cu mingea, grenadele şi avalanşele, cu cele referitoare la lumină. Ca să facem comparaţia mai clară, să ne imaginăm că raza de lumină e compusă din *pachete* mici cunoscute sub numele de fotoni (vom vorbi despre această caracteristică a luminii mai pe larg în capitolul 4). Când aprindem o lanternă sau un laser, de fapt tragem cu un fascicul de fotoni în direcţia în care îndreptăm instrumentul. La fel ca în cazul grenadelor şi al avalanşelor, să vedem cum e percepută mişcarea unui foton de către cineva care se mişcă. Imaginează-ţi că prietena care a înnebunit a schimbat grenada cu un laser puternic. Dacă ar trage

cu laserul în direcția ta – și dacă ai avea la dispoziție echipamentul de măsură necesar – ai constata că viteza cu care se apropie fotonii din raza laser este de 670 de milioane de mile pe oră. Dar dacă ai lua-o la goană, așa cum ai făcut când te temeai că aruncă spre tine cu o grenadă? Ce viteză ar avea atunci fotonii care se apropie? Pentru ca lucrurile să fie mai palpitante, să ne imaginăm că fugi din fața acestei prietene sărind în nava spațială Enterprise, care decolează, să zicem, cu 100 milioane de mile pe oră. Urmărind raționamentul din punctul de vedere tradițional, newtonian, din moment ce fugi cu o asemenea viteză, te aștepți ca viteza cu care fotonii se apropie să fie *mai mică*. Mai precis, te-ai aștepta ca ei să se apropie de tine cu (670 de milioane de mile pe oră – 100 de milioane de mile pe oră =) 570 de milioane de mile pe oră.

Dovezi cumulate dintr-o mulțime de experimente, începând încă din anii 1880, împreună cu analiza și interpretarea atentă a teoriei electromagnetice a luminii elaborate de Maxwell au convins încetul cu încetul pe oamenii de știință că nu vei observa acest lucru. *Cu toate că tu fugi, viteza cu care fotonii vin după tine, așa cum o măsori tu, este tot de 670 de milioane de mile pe oră, nici o fracțiune mai puțin.* Deși la început acest lucru pare complet ridicol, și spre deosebire de ceea ce se întâmplă când fugi de o minge, de o grenadă sau de o avalanșă, viteza cu care se apropie fotonii este întotdeauna de 670 de milioane de mile pe oră. Același lucru se întâmplă și dacă fugi către fotonii care vin spre tine, și dacă îi urmărești pe cei care se îndepărtează – viteza cu care ei se apropie sau se îndepărtează rămâne neschimbată; ei călătoresc tot cu 670 de milioane de mile pe oră. Indiferent de mișcarea relativă dintre sursa de fotoni și observator, viteza luminii este întotdeauna aceeași[7].

Datorită limitărilor tehnologice, „experimente“ cu lumină precum cele descrise mai sus nu pot fi efectuate în realitate. Se pot însă face experimente comparabile. De exemplu, în 1913, fizicianul olandez Willem de Sitter a sugerat că stelele binare cu mișcare rapidă (ansamblu de două stele care orbitează una în jurul celeilalte) ar putea fi folosite pentru a măsura efectul mișcării sursei asupra vitezei luminii. Diverse experimente de acest tip efectuate în ultimii 80 de ani au verificat că viteza luminii provenite de la o stea în mișcare este *aceeași* cu viteza luminii provenite de la o stea staționară – 670 de milioane de mile pe oră – măsurată cu precizia impresionantă a aparatelor de

aparatură din ce în ce mai perfecţionate. Mai mult, numeroase alte experimente au fost făcute în ultimul secol – experimente ce măsoară direct viteza luminii în diverse împrejurări şi testează multe din implicaţiile acestei caracteristici a luminii, aşa cum am arătat deja pe scurt – iar toate au confirmat valoarea constantă a acestei viteze.

Dacă ţi se pare greu să înţelegi această proprietate a luminii, să ştii că nu eşti singurul. La începutul secolului XX, fizicienii s-au străduit s-o infirme. Nu au reuşit. Einstein, dimpotrivă, a acceptat valoarea constantă a vitezei luminii, pentru că în felul acesta rezolva contradicţia care îl tulburase încă din adolescenţă. Indiferent cât de tare alergi după o rază de lumină, ea fuge de tine cu viteza luminii. Nu poţi schimba viteza aparentă de 670 de milioane de mile pe oră a luminii, ca să nu mai vorbim că e imposibil s-o încetineşti până se opreşte. Cazul a fost închis. Acest triumf asupra paradoxului nu a fost o victorie uşoară. Einstein a înţeles că o valoare constantă a vitezei luminii implică detronarea fizicii newtoniene.

Adevăruri şi consecinţe

Viteza este o măsură a distanţei pe care un obiect o parcurge într-un timp dat. Dacă suntem într-o maşină care merge cu 65 de mile pe oră, asta înseamnă că vom parcurge 65 de mile dacă ne vom păstra această stare de mişcare timp de o oră. Definită astfel, viteza pare să fie un concept simplu, şi atunci te întrebi ce rost au mai avut discuţiile privind viteza mingilor, avalanşelor de zăpadă şi fotonilor. Să nu uităm însă că *distanţa* este o noţiune legată de spaţiu – în particular ea măsoară cât spaţiu este între două puncte. De asemenea, să observăm că durata este o noţiune legată de timp – cât timp se scurge între două evenimente. Prin urmare, viteza este intim legată de noţiunile de spaţiu şi timp. Cu această formulare, observăm că orice rezultat experimental care sfidează concepţia noastră obişnuită despre viteză, aşa cum este de exemplu valoarea constantă a vitezei luminii, sfidează înseşi concepţiile noastre generale despre spaţiu şi timp. Din acest motiv, ciudata constanţă a vitezei luminii merită o cercetare mai atentă – cercetare întreprinsă şi de Einstein şi care l-a condus la concluzii remarcabile.

Efectul asupra timpului: Partea I

Cu efort minim, putem să ne folosim de faptul că viteza luminii este întotdeauna aceeaşi pentru a arăta că ideea noastră de timp, aşa cum rezultă din experienţa de zi cu zi, este pur şi simplu greşită. Să ne imaginăm că liderii a două naţiuni aflate în război sunt aşezaţi la capetele opuse ale unei mese lungi de negocieri şi au ajuns la un acord de încetare a focului. Numai că nici unul nu vrea să semneze acordul înaintea celuilalt. Atunci, secretarul general ONU are o idee „genială". Vor plasa un bec electric, iniţial stins, la mijlocul distanţei dintre cei doi preşedinţi. Când va fi aprins, lumina emisă de bec va ajunge simultan la preşedinţi, din moment ce ei sunt echidistanţi faţă de bec. Fiecare dintre preşedinţi a fost de acord să semneze copia acordului în momentul în care va vedea lumina. Planul este dus la bun sfârşit şi acordul este semnat spre satisfacţia ambelor părţi.

Încurajat de succes, secretarul general foloşeste aceeaşi tehnică şi cu alte două naţiuni aflate în conflict, care au ajuns şi ele la un consens. Singura diferenţă este că preşedinţii aflaţi în tratative stau la capetele opuse ale unei mese aşezate în interiorul unui tren ce se deplasează cu viteză constantă. Astfel, preşedintele Ţării Înainte stă cu faţa în direcţia de mers a trenului, în timp ce preşedintele Ţării Înapoi stă cu faţa în direcţia opusă. Cunoscând faptul că legile fizicii au exact aceeaşi formă indiferent de starea de mişcare a observatorului, atât timp cât mişcarea acestuia este constantă, secretarul general nu se mai gândeşte la alte amănunte şi demarează ceremonia de semnare-la-aprinderea-becului, ca mai înainte. Amândoi preşedinţii semnează acordul şi, împreună cu anturajul lor de consilieri, sărbătoresc încheierea ostilităţilor.

Chiar atunci soseşte vestea că lupta a reînceput între popoarele celor două ţări, care priviseră ceremonia semnării acordului de pe peronul pe lângă care trecea trenul. Toţi cei aflaţi în trenul în care avuseseră loc negocierile au fost consternaţi să afle că motivul reînceperii ostilităţilor era că poporul Ţării Înainte considera că a fost păcălit, preşedintele lor a semnat acordul *înaintea* preşedintelui Ţării Înapoi. Cum toţi cei din tren – din ambele tabere – confirmau că acordul a fost semnat simultan, cum era posibil ca observatorii din afara trenului să fi văzut altceva?

Să analizăm însă mai în detaliu perspectiva unui observator de pe peron. Inițial, becul din tren era stins, iar apoi, la un anumit moment, s-a luminat, trimițând raze de lumină spre ambii președinți. Din perspectiva unei persoane de pe peron, președintele Țării Înainte se îndreaptă spre lumina emisă, în timp ce președintele Țării Înapoi se retrage din fața ei. Asta înseamnă, pentru observatorii de pe peron, că raza de lumină parcurge o distanță mai mică pentru a ajunge la președintele Țării Înainte decât pentru a ajunge la președintele Țării Înapoi. Această afirmație nu se referă la *viteza* cu care lumina se îndreaptă spre cei doi președinți – știm deja că viteza luminii este întotdeauna aceeași, indiferent de starea de mișcare a sursei sau a observatorului. Noi avem aici în vedere, din perspectiva observatorilor de pe peron, cât de departe trebuie să călătorească raza de lumină pentru a ajunge la fiecare dintre cei doi președinți. Cum această distanță este mai mică în cazul președintelui Țării Înainte decât în cazul președintelui Țării Înapoi, și cum viteza luminii spre fiecare din ei este aceeași, lumina va ajunge mai întâi la președintele Țării Înainte. De aceea cetățenii Țării Înainte susțin că au fost păcăliți.

Când CNN a difuzat declarațiile martorilor oculari, secretarului general, celor doi președinți și tuturor consilierilor lor nu le-a venit să-și creadă urechilor. Cu toții erau convinși că, din moment ce becul fusese bine fixat exact la jumătatea distanței dintre celor doi președinți, lumina emisă de el a parcurs *aceeași* distanță pentru a ajunge la fiecare dintre ei. Cum viteza luminii emisă în stânga sau în dreapta este aceeași, ei cred, așa cum de altfel au și observat, că lumina a ajuns simultan la ambii președinți.

Cine are dreptate, cei din tren sau cei din afara trenului? Observațiile fiecărui grup și explicațiile aduse sunt impecabile. Răspunsul este că fiecare grup are dreptate. Ca și în cazul celor doi călători spațiali, George și Gracie, *ambele* perspective sunt la fel de corecte. Singura problemă este că cele două adevăruri par contradictorii. În joc e o miză politică importantă: au semnat cei doi președinți tratatul în același timp sau nu? Observațiile și raționamentele de până acum ne duc la concluzia că *pentru cei din tren acordul s-a semnat simultan*, pe când *din punctul de vedere al celor de pe peron acordul nu s-a semnat simultan.* Cu alte cuvinte, evenimente care sunt simultane din punctul de vedere al unor observatori nu vor fi simultane din punctul de vedere al altora dacă cele două grupuri se află în mișcare relativă.

Aceasta e o concluzie uluitoare. Este una dintre cele mai pătrunzătoare descoperiri privind natura realității din câte s-au făcut vreodată. Dacă la mult timp după cei vei citi această carte nu-ți vei mai aduce aminte nimic din acest capitol, în afară de încercarea nereușită a celor doi președinți de a detensiona situația politică, înseamnă că ai reținut esența descoperirii lui Einstein. Fără matematici înalte sau înlănțuiri complicate de raționamente, această trăsătură complet neașteptată a timpului rezultă direct din invariabilitatea vitezei luminii, așa cum arată scenariul de mai sus. Să observăm că dacă viteza luminii nu ar fi fost constantă, ci lumina s-ar fi comportat conform intuiției noastre, bazată pe mișcarea înceată a mingilor sau a avalanșelor de zăpadă, observatorii de pe peron ar fi fost de aceeași părere cu cei din tren. Un observator de pe peron ar fi susținut că fotonii parcurg un drum mai lung pentru a ajunge la președintele Țării Înapoi decât la președintele Țării Înainte. Pe de altă parte, intuiția uzuală ne spune că lumina se apropie de președintele Țării Înapoi cu o viteză mai mare, deoarece a primit un brânci de la trenul care se mișcă. În mod similar, aceiași observatori ar vedea lumina apropiindu-se mai încet de președintele Țării Înainte, fiind trasă înapoi de mișcarea trenului. După ce toate aceste efecte (eronate) au fost luate în considerare, observatorii de pe peron ar trage concluzia că razele de lumină ajung simultan la ambii președinți. Totuși, în lumea reală, lumina nu se mișcă nici mai repede, nici mai încet, nu poate fi împinsă ca să ia viteză, nici nu poate fi trasă înapoi ca să încetinească. Observatorii de pe peron vor fi deci îndreptățiți să pretindă că lumina ajunge mai întâi la președintele Țării Înainte.

Valoarea constantă a vitezei luminii impune renunțarea la concepția învechită conform căreia simultaneitatea este universal valabilă, indiferent de starea de mișcare a observatorilor. Ceasul universal, despre care în trecut se credea că ticăie imperturbabil secunde identice pe Pământ, ca și pe Marte, pe Jupiter, în galaxia Andromeda și în fiecare ungher al cosmosului, nu există de fapt. Dimpotrivă, observatorii în mișcare relativă nu vor putea decide care evenimente se petrec în același timp. Din nou, motivul pentru care această concluzie – o caracteristică intrinsecă a lumii în care trăim – ne este atât de nefamiliară e că efectele sunt extrem de mici la vitezele cu care avem de-a face în viața de zi cu zi. Dacă masă de negocieri ar fi de 100 de picioare lungime și trenul s-ar deplasa cu 10 mile pe oră, observatorii

de pe peron ar „vedea" că lumina ajunge la preşedintele Ţării Înainte cu aproximativ o milionime de miliardime de secundă înainte de a ajunge la preşedintele Ţării Înapoi. Deşi e vorba de o diferenţă reală, ea este atât de mică, încât nu poate fi detectată în mod direct de simţurile umane. Dacă trenul s-ar mişca mult mai rapid, să zicem cu 600 de milioane de mile pe oră, din perspectiva cuiva care stă pe peron, luminii i-ar trebui de aproximativ 20 de ori mai mult timp ca să ajungă la preşedintele Ţării Înapoi decât ca să ajungă la preşedintele Ţării Înainte. La viteze mari, efectele uluitoare ale teoriei speciale a relativităţii devin din ce în ce mai pronunţate.

Efectul asupra timpului: Partea a II-a

E dificil să dai o definiţie abstractă a timpului – încercările de a face acest lucru se încheie de regulă tot prin invocarea cuvântului „timp" sau se fac tot felul de acrobaţii lingvistice doar cu scopul de a evita cuvântul. În loc să procedăm în felul acesta, vom adopta un punct de vedere pragmatic şi vom defini timpul ca fiind ceea ce măsoară ceasurile. Astfel, bineînţeles povara definiţiei cade asupra cuvântului „ceas"; putem atunci să ne gândim la ceas ca la un dispozitiv care efectuează o mişcare ciclică perfect regulată. Vom măsura timpul numărând ciclurile pe care le face ceasul. Această definiţie este potrivită pentru ceasurile cu care suntem noi obişnuiţi, cum ar fi ceasul de mână; ele au limbi care se mişcă efectuând cicluri regulate, iar noi într-adevăr măsurăm timpul scurs numărând ciclurile (sau fracţiunile de ciclu) parcurse de limbi între două evenimente alese.

Bineînţeles, noţiunea de „cicluri de mişcare perfect regulate" implică noţiunea de timp, din moment ce „regulat" se referă la durate de timp egale ce se scurg la fiecare ciclu. Din punct de vedere practic însă, noi realizăm acest lucru construind ceasuri din componente fizice simple de la care, pe baza unor principii fundamentale, ne aşteptăm să aibă evoluţii ciclice repetitive care să nu se schimbe în nici un fel de la un ciclu la altul. Vechile ceasuri cu pendulele lor care se balansează şi ceasurile atomice bazate pe procese atomice repetitive sunt numai două exemple simple.

Scopul nostru este să înţelegem modul în care mişcarea influenţează trecerea timpului, şi cum am definit timpul într-un mod operaţional

ca fiind determinat de ceasuri, putem reformula întrebarea: cum este influențat „ticăitul" ceasurilor de mişcarea observatorului? Este foarte important să subliniem încă de la început că discuția noastră nu se referă la modul în care elementele mecanice ale unui anumit ceas se comportă la zguduituri sau izbituri provocate de o mişcare neregulată. De fapt, vom considera numai mişcarea cea mai simplă şi mai liniştită – mişcarea cu viteză absolut constantă – şi deci nu va fi vorba de nici un fel de zguduituri sau izbituri. Ne interesează răspunsul la întrebarea universală legată de felul în care influențează mişcarea trecerea timpului, deci de felul în care afectează în mod fundamental ticăitul *oricărui* ceas şi *tuturor* ceasurilor, indiferent de proiectarea sau construcția lor.

În acest scop, introducem ceasul care din punct de vedere conceptual este cel mai simplu (dar şi cel mai puțin practic). E cunoscut sub numele de „ceas cu lumină" şi constă din două oglinzi mici montate față în față pe un suport şi cu un singur foton de lumină propagându-se înainte şi înapoi între ele (vezi figura 2.1). Dacă oglinzile sunt la aproximativ 6 țoli* una de alta, fotonului îi va lua aproximativ o miliardime de secundă ca să facă un tur dus-întors. Ne putem gândi că ticăiturile ceasului cu lumină se produc de fiecare dată când fotonul face un tur dus-întors – un miliard de ticăituri marchează trecerea unei secunde.

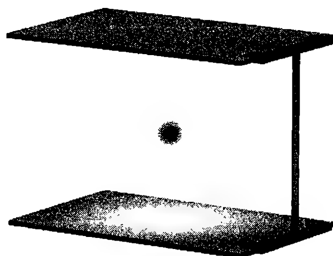


Figura 2.1. Un ceas cu lumină constă din două oglinzi paralele şi un foton care se reflectă de la una la alta. Ceasul „ticăie" de fiecare dată când fotonul încheie un drum dus-întors.

---

* Un țol (inch) reprezintă 2,54 cm. (*N. red.*)

Putem folosi ceasul cu lumină ca pe un cronometru pentru măsurarea timpului scurs între două evenimente: pur și simplu numărăm câte ticăituri au loc în perioada pe care vrem s-o măsurăm și înmulțim acest număr cu timpul corespunzător unui ticăit. De exemplu, dacă cronometrăm o cursă de cai și numărăm între start și sosire 55 de miliarde de ture ale fotonului, atunci tragem concluzia că durata cursei a fost de 55 de secunde.

Motivul pentru care folosim ceasul cu lumină în discuția noastră este acela că simplitatea mecanicii lui înlătură detaliile de prisos și ne oferă cea mai clară imagine asupra modului cum afectează mișcarea trecerea timpului. De exemplu, să ne imaginăm că urmărim trecerea timpului privind cum ticăie un ceas cu lumină plasat pe masa din apropiere. Apoi, un al doilea ceas cu lumină alunecă pe lângă el pe masă, mișcându-se cu viteză constantă (vezi figura 2.2). Întrebarea pe care ne-o punem este dacă ceasul aflat în mișcare va ticăi cu aceeași frecvență ca și ceasul staționar.

Pentru a răspunde la această întrebare, să considerăm, din perspectiva observatorului staționar, drumul străbătut de fotonul din ceasul cu lumină care se mișcă pentru a realiza un ticăit. Fotonul pornește de la baza ceasului care alunecă, așa cum se vede în figura 2.2, și mai întâi se îndreaptă spre oglinda de sus. Cum din perspectiva noastră ceasul se deplasează, fotonul trebuie să se miște sub un anumit unghi, așa cum se vede în figura 2.3. Dacă fotonul nu s-ar deplasa pe această traiectorie, atunci nu ar nimeri oglinda de sus și ar zbura mai departe, în spațiu. Cum ceasul care alunecă la viteză constantă are tot dreptul să pretindă că e staționar și că lucrurile din jurul lui se mișcă, știm că fotonul *va lovi* oglinda superioară și deci traiectoria desenată de noi este corectă. Fotonul se reflectă în oglinda de sus, după care călătorește din nou pe un drum diagonal până la oglinda de jos;

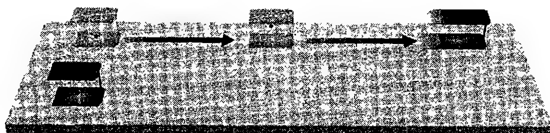


Figura 2.2. Un ceas cu lumină staționar, în prim-plan, pe lângă care alunecă la viteză constantă un al doilea ceas cu lumină.

când ajunge aici, ceasul cu lumină ticăie. Lucrul simplu, dar esențial, pe care îl observăm aici este că dublul drum diagonal pe care îl face fotonul în ceasul care se mişcă este mai lung decât drumul drept, în sus şi în jos, urmat de fotonul din ceasul staționar; în plus față de traversarea distanței în sus şi în jos, din perspectiva noastră fotonul din ceasul care alunecă trebuie să călătorească și spre dreapta. Viteza luminii este întotdeauna aceeaşi, deci fotonul din ceasul care alunecă se deplasează cu exact aceeaşi viteză ca şi cel din ceasul staționar. Dar cum primul trebuie să parcurgă o distanță mai mare pentru a ticăi o dată, înseamnă că el va ticăi *mai rar*. Cu un argument simplu am stabilit deci că, din perspectiva noastră, ceasul cu lumină aflat în mişcare ticăie mai rar decât ceasul cu lumină staționar. Şi cum am stabilit că numărul de ticăituri reflectă în mod direct cât timp a trecut, observăm că scurgerea timpului este încetinită pentru ceasul aflat în mişcare.

V-ați putea întreba dacă aceasta caracteristică a ceasului cu lumină este aplicabilă şi pendulelor sau ceasurilor Rolex. Este timpul măsurat de aceste ceasuri, mai familiare nouă, de asemenea încetinit? Răspunsul este un da hotărât, aşa cum vom arăta printr-o aplicație a principiului relativității. Să ataşăm câte un ceas Rolex deasupra fiecărui ceas cu lumină şi să reluăm experimentul anterior. Așa cum am arătat, ceasul staționar şi ceasul Rolexul ataşat lui măsoară durate de timp identice, numărând un miliard de ticăituri ale ceasului cu lumină la fiecare secundă măsurată de Rolex. Dar ce se întâmplă cu ceasul cu lumină care se mişcă şi cu Rolexul ataşat lui? Oare frecvența ticăiturilor Rolexului în mişcare încetineşte de asemenea, astfel încât el sa rămână sincronizat cu ceasul cu lumină la care e ataşat? Ei bine, pentru a face cât mai convingătoare demonstrația, să ne imaginăm că ansamblul ceas cu lumină-Rolex se mişcă deoarece este fixat de podeaua unui compartiment de tren fără geamuri, care alunecă la viteză constantă, pe nişte şine perfect drepte și netede. Conform principiului relativității, e imposibil pentru un observator din tren să detecteze vreo influență a mişcării trenului. Dar dacă ceasul cu lumină și Rolexul nu ar mai fi sincronizate, aceasta ar fi o influență care poate fi observată. Prin urmare, ceasul cu lumină din tren şi Rolexul ataşat la el *trebuie* să măsoare durate de timp egale; Rolexul trebuie să încetinească exact atât cât încetineşte şi ceasul cu lumină. Indiferent de marcă, tip sau construcție, ceasuri aflate în mişcare unul față de altul înregistrează trecerea timpului în mod diferit.

Discuția referitoare la ceasul cu lumină lămurește și faptul că diferența de timp dintre ceasurile staționare și cele în mișcare depinde de lungimea traiectoriei pe care o parcurge fotonul ceasului aflat în mișcare pentru a face un drum dus-întors între oglinzile sale. Aceasta, la rândul ei, depinde de cât de repede se mișcă ceasul care alunecă – din punctul de vedere al unui observator staționar, cu cât ceasul alunecă mai repede, cu atât fotonul parcurge un drum mai lung. Vom trage deci concluzia că, în comparație cu un ceas staționar, frecvența cu care ticăie ceasul care alunecă devine din ce în ce mai mică pe măsură ce ceasul se mișcă din ce în ce mai repede.[8]

Pentru a ne face o idee despre scara mărimilor implicate, să ne amintim că fotonul străbate un drum dus-întors în aproximativ o miliardime de secundă. Pentru ca ceasul să poată parcurge o distantă semnificativă pe durata unei ticăituri, el ar trebui să călătorească extrem de repede – adică viteza lui să fie o fracțiune semnificativă din viteza luminii. Dacă merge cu o viteză obișnuită de, să zicem, 10 mile pe oră, distanța cu care se mișcă la dreapta în timpul unei ticăituri este minusculă – 15 miliardimi de picior. Distanța suplimentară pe care o parcurge fotonul ceasului în mișcare este infimă și are deci un efect infim asupra frecvenței de ticăiturilor. Din nou, conform principiului relativității acest lucru este valabil pentru toate ceasurile – adică pentru timpul însuși. De aceea, pentru care ființe ca noi, care ne mișcăm unii față de alții cu viteze atât de mici, distorsiunile apărute în scurgerea timpului sunt neobservabile. Deși prezența lor este certă, efectele sunt incredibil de mici. Dacă am putea însă deplasa ceasul în mișcare cu, să zicem, trei sferturi din viteza luminii, atunci ecuațiile teoriei speciale a relativității ar putea fi folosite pentru a arăta că observatorii staționari ar vedea ceasul în mișcare ticăind cu o frecvență care este aproape două treimi din frecvența ceasului lor. Un efect într-adevăr semnificativ.

Viața pe fugă

Am văzut că valoarea constantă a vitezei luminii implică faptul că un ceas cu lumină aflat în mișcare ticăie mai încet decât un ceas cu lumină staționar. Și, conform principiului relativității, acest lucru este valabil nu numai pentru ceasurile cu lumină, ci pentru orice ceas –

este valabil pentru timpul însuşi. Timpul trece mai încet pentru un individ aflat în mişcare decât pentru unul în repaus. Dacă raţionamentul simplu care ne-a dus la această concluzie este corect, atunci nu ar trebui, de exemplu, să trăim mai mult dacă suntem în mişcare decât dacă stăm pe loc? La urma urmei, dacă timpul trece mai încet pentru un individ în mişcare decât pentru un individ în repaus, atunci această discrepanţă nu ar trebui să se aplice doar la timpul măsurat de ceasuri, ci şi la ritmul bătăilor inimii şi al degradării diverselor părţi ale corpului uman. Dar aşa se şi întâmplă, după cum a fost confirmat experimental în mod direct – nu prin lungirea speranţei de viaţă a oamenilor, ci folosind nişte particule microscopice: miuonii. Există totuşi o capcană aici, care ne împiedică să proclamăm că am descoperit fântâna tinereţii.

Când se află în repaus în laborator, miuonii se dezintegrează printr-un proces asemănător cu dezintegrarea radioactivă, în aproximativ două milionimi de secundă. Această dezintegrare este un fapt experimental bazat pe o imensă cantitate de date experimentale. E ca şi cum miuonul îşi trăieşte viaţa cu pistolul la tâmplă: când atinge vârsta de aproximativ două milionimi de secundă apasă pe trăgaci şi explodează transformându-se în electroni şi neutrini. Dacă însă aceşti miuoni nu sunt în repaus, ci călătoresc printr-un aparat cunoscut sub numele de accelerator de particule care îi accelerează până la viteze foarte apropiate de viteza luminii, durata lor medie de viaţă, măsurată de oamenii de ştiinţă în laborator, creşte spectaculos. Aşa ceva se întâmplă cu adevărat. La viteze de 667 de milioane de mile pe oră (cam 99,5% din viteza luminii), durata medie de viaţă a miuonului creşte cam cu un factor de zece. Explicaţia conformă cu teoria relativităţii este că „ceasurile de mână purtate de miuoni“ ticăie mult mai încet decât ceasurile din laborator, aşa că, mult după ce ceasurile din laborator au indicat că miuonii ar fi trebuit să apese pe trăgaci şi să explodeze, ceasurile miuonilor rapizi nu au ajuns încă la ora fatală. Aceasta este o demonstraţie directă şi spectaculoasă a efectului mişcării asupra scurgerii timpului. Dacă oamenii s-ar mişca cu viteze egale cu cele ale acestor miuoni, durata lor de viaţa ar creşte cu acelaşi factor. În loc să trăiască 70 de ani, oamenii ar trăi 700 de ani.[9]

Şi acum capcana. Deşi observatorii din laborator văd că miuonii care se mişcă rapid au o durată de viaţă mai mare decât fraţii lor staţionari, aceasta se datorează timpului care se scurge mai încet pentru

miuonii în mișcare. Încetinirea timpului nu se aplică doar ceasurilor purtate de miuoni, ci și tuturor celorlalte activități desfășurate de ei. De exemplu, dacă un miuon staționar poate citi 100 de cărți în timpul scurtei sale vieți, vărul său aflat în mișcare rapidă va putea citi tot 100 de cărți, deoarece, deși pare să trăiască mai mult decât miuonul staționar, viteza lui de citire – ca toate celelalte activități din viața lui – a fost încetinită corespunzător. Din perspectiva laboratorului, e ca și cum miuonul în mișcare își trăiește viața cu încetinitorul; din acest punct de vedere, miuonul în mișcare va trăi mai mult decât cel staționar, dar „cantitatea de viață" trăită va fi exact aceeași pentru amândoi. Aceeași concluzie este valabilă și pentru oamenii care se mișcă rapid și având o speranță de viață de mai multe secole. Din perspectiva *lor*, viața este cea obișnuită. Din perspectiva noastră, ei își trăiesc viața în mișcare hiperîncetinită și prin urmare orice activitate normală din viața lor se petrece pe o perioadă foarte lungă din *timpul nostru*.

Și totuși, cine se mișcă?

Relativitatea mișcării reprezintă cheia pentru înțelegerea teoriei relativității a lui Einstein, dar și o sursă potențială de confuzie. Ați observat probabil că o schimbare a perspectivei poate schimba rolurile miuonilor în mișcare, ale căror ceasuri rămân în urmă, cu cele ale miuonilor staționari. La fel cum în cazul lui George și Gracie fiecare era la fel de îndreptățit să declare că el se afla în repaus și celălalt în mișcare, miuonii despre care spunem că se află în mișcare sunt îndreptățiți să afirme că, din perspectiva lor, sunt nemișcați, iar miuonii „staționari" sunt cei care se mișcă, în direcția opusă. Argumentele de mai sus pot fi aplicate la fel de bine și din această perspectivă, ducând la o concluzie aparent opusă celei dintâi, anume că ceasurile purtate de miuonii pe care i-am numit staționari rămân în urmă în raport cu cele purtate de miuonii considerați a fi în mișcare.

Am întâlnit deja o situație – ceremonia de semnare a acordului de pace la aprinderea becului – în care puncte de vedere diferite duc la rezultate aparent contradictorii. Atunci am fost obligați de raționamentele elementare ale teoriei relativității speciale să renunțăm la ideea adânc înrădăcinată că toată lumea, indiferent de starea de mișcare,

cade de acord asupra evenimentelor simultane. Incongruența aceasta nouă pare însă și mai problematică. Cum e posibil ca fiecare dintre cei doi observatori să pretindă că ceasul celuilalt merge mai încet? Mai grav, cele două perspective, diferite, dar egal îndreptățite, ne conduc la concluzia că miuonii din fiecare grup vor susține – cu fermitate și tristețe – că ei vor muri primii. Descoperim că lumea poate avea unele trăsături neașteptat de stranii, dar sperăm că lucrurile nu vor trece în sfera absurdului. Deci, ce se petrece?

Așa cum se întâmplă cu toate paradoxurile care apar în teoria relativității, dacă examinăm mai atent aceste dileme de logică, ajungem de fapt să descoperim noi perspective asupra funcționării universului. Pentru a evita antropomorfizări și mai grave, să ne întoarcem de la miuoni la Gracie și George care au acum, pe lângă luminile care clipesc, și ceasuri digitale luminoase atașate la costumele lor spațiale. Din perspectiva lui George, el este staționar, în timp ce Gracie, cu lumina ei verde, intermitentă, și cu ceasul digital mare, apare în depărtare, iar apoi, trecând pe lângă el, dispare în spațiul întunecat. El observă că ceasul lui Gracie rămâne în urmă față de al său (ritmul încetinirii depinzând de cât de repede trec unul pe lângă altul). Dacă ar fi fost ceva mai atent, ar fi observat în plus că, pe lângă faptul că ceasul lui Gracie mergea mai încet, tot ce era legat de ea – modul de a-i face cu mâna în trecere, viteza cu care clipea și așa mai departe – se desfășura încetinit. Din perspectiva lui Gracie, exact aceleași observații sunt valabile pentru George.

Deși pare paradoxal, să încercăm să ne imaginăm un experiment care să ne conducă la o absurditate logică. Cea mai simplă modalitate este să aranjăm lucrurile așa încât, în momentul când trec unul pe lângă altul, George și Gracie să-și potrivească amândoi ceasurile la 12:00. Apoi, când se depărtează, fiecare pretinde că ceasul celuilalt rămâne în urmă. Pentru a verifica această discordanță, George și Gracie trebuie să se reîntâlnească și să compare direct timpul scurs pe ceasurile lor. Dar cum să facă asta? Ei bine, George are un propulsor pe care îl poate folosi pentru ca – din perspectiva sa – s-o ajungă din urmă pe Gracie. Dar dacă procedează astfel strică simetria dintre cele două perspective, care era de fapt cauza acestui paradox aparent, deoarece George va suferi o mișcare *accelerată*, nu una constantă, „fără forțe". Când se reîntâlnesc deci, ceasul lui George va arăta într-adevăr că a trecut mai puțin timp, iar el poate afirma cu certitudine că s-a aflat

în mişcare, întrucât a simţit acest lucru. Perspectivele lui George şi Gracie nu mai sunt pe picior de egalitate. Pornind propulsorul, George nu mai poate susţine că a stat pe loc.

Dacă George o ajunge pe Gracie din urmă în acest fel, diferenţa de timp pe care ceasurile lor o vor arăta depinde de viteza lor relativă şi de detalii legate de modul în care George şi-a folosit propulsorul. După cum ştim deja, dacă vitezele implicate sunt mici, diferenţa va fi minusculă. Dar dacă este vorba de viteze comparabile cu viteza luminii, atunci diferenţele pot fi minute, zile, ani, secole, ba chiar mai mult. Ca exemplu concret, să ne imaginăm că viteza relativă a lui George şi Gracie, când trec unul pe lângă altul, este de 99,5% din viteza luminii. Apoi, să presupunem că George aşteaptă după ceasul său 3 ani şi îşi porneşte propulsorul într-o explozie de o clipă, ceea ce îl aruncă spre Gracie cu aceeaşi viteză cu care se îndepărtau mai devreme unul de celălalt, deci cu 99,5% din viteza luminii. Când ajunge la Gracie, 6 ani se vor fi scurs pe ceasul lui, căci îi vor trebui încă 3 ani s-o prindă din urmă. Calcule de teoria specială a relativităţii arată însă că pe ceasul lui Gracie se vor fi scurs în acest timp 60 de ani. Nu e nici o scamatorie: Gracie va trebui într-adevăr să-şi amintească acum faptul că în urmă cu 60 de ani l-a văzut pe George trecând pe lângă ea prin spaţiu. Pentru George însă, toate acestea s-au întâmplat în urmă cu doar 6 ani. Mişcarea l-a transformat cu adevărat pe George într-un călător în timp, dar într-un sens foarte precis: el a călătorit în viitorul lui Gracie.

Readucerea la un loc a celor două ceasuri pentru comparaţie poate părea doar o complicaţie logistică, dar de fapt ea constituie însăşi miezul problemei. Ne putem imagina o mulţime de trucuri pentru a ocoli această fisură din armura paradoxului, dar până la urmă toate dau greş. De exemplu, ce-ar fi dacă în loc să readucem ceasurile unul lângă altul, Gracie şi George şi-ar compara ceasurile comunicând prin telefoane celulare? Dacă în acest mod comunicarea ar fi instantanee, am fi într-adevăr puşi în faţa unei contradicţii insurmontabile: judecând din perspectiva lui Gracie, ceasul lui George rămâne în urmă şi deci el îi va transmite că a trecut mai puţin timp; judecând din perspectiva lui George, ceasul lui Gracie rămâne în urmă şi deci ea îi va comunica scurgerea unui timp mai scurt. E imposibil ca amândoi să aibă dreptate, şi atunci ne scufundăm. Ideea-cheie este că telefoanele celulare, ca toate formele de comunicare, nu transmit semnalul instantaneu. Telefoanele

celulare operează cu unde radio, care sunt o formă de lumină, deci semnalul se transmite cu viteza luminii. Aceasta înseamnă că semnalul este recepţionat cu o anumită întârziere – exact întârzierea necesară pentru a face cele două perspective compatibile.

Să analizăm mai întâi perspectiva lui George. Să ne imaginăm că o data pe oră, la ora exactă, George recită la telefon: „este ora 12 şi totul e în regulă“, „este ora 1 şi totul e în regulă“ şi aşa mai departe. Cum, din perspectiva lui, ceasul lui Gracie rămâne în urmă, în primul moment el crede că Gracie va primi mesajele lui înainte ca ceasul ei să indice ora exactă. Astfel, el trage concluzia că Gracie va trebui să recunoască faptul că ceasul ei rămâne în urmă. Dar apoi el se gândeşte din nou: „Dacă Gracie se îndepărtează de mine, semnalul pe care i l-am trimis prin telefonul celular va trebui să călătorească o distanţă şi mai mare pentru a ajunge la ea. Poate că acest timp suplimentar compensează timpul cu care ceasul ei rămâne în urmă.“ Când George îşi dă seama că există efecte care se compensează – întârzierea ceasului lui Gracie şi timpul de transmitere a semnalului –, rămâne pe gânduri şi hotărăşte să evalueze cantitativ efectele lor combinate. Rezultatul pe care îl obţine este că timpul de transmitere a semnalului e mai lung decât cel necesar pentru a compensa încetinirea ceasului lui Gracie. El ajunge la concluzia surprinzătoare că Gracie va primi semnalele care marchează scurgerea unei ore pe ceasul lui după ce ora exactă a trecut conform ceasului ei. De fapt, George e conştient de cunoştinţele de fizică ale lui Gracie şi ştie că ea va lua în considerare timpul de transmitere a semnalului pentru a trage concluzii asupra modului de funcţionare a ceasului lui George, bazându-se pe mesajele transmise de el prin celular. Calculul amănunţit arată că, dacă ia în considerare timpul de transmitere a semnalului, Gracie ajunge la concluzia că ceasul lui George ticăie mai încet decât al ei.

Exact acelaşi raţionament se aplică şi când adoptăm perspectiva lui Gracie, ea fiind cea care trimite la fiecare oră semnale către George. Mai întâi, încetinirea ceasului lui George din perspectiva ei o face să creadă că acesta îi va primi mesajele înainte ca el să ajungă să le trimită pe ale lui. Dar când Gracie ia în considerare distanţele din ce în ce mai mari pe care semnalul trebuie să le parcurgă pentru a ajunge la George, care se depărtează în întuneric, îşi dă seama că de fapt George le va primi *după* ce le va fi trimis pe ale sale. La rândul ei, Gracie înţelege că, dacă George ia în considerare timpul de transmitere a sem-

nalului, din comunicarea telefonică a lui Gracie el va trage concluzia că ceasul ei merge mai încet decât al lui.

Atât timp cât nici George, nici Gracie nu accelerează, perspectivele lor sunt pe picior de egalitate. Deşi pare paradoxal, în acest mod, amândoi îşi dau seama că fiecare dintre ei e perfect îndreptăţit să creadă că ceasul celuilalt rămâne în urmă.

Efectul mişcării asupra spaţiului

Discuţia precedentă ne-a arătat că observatorii văd ceasurile în mişcare ticăind mai încet decât ale lor – deci mişcarea afectează timpul. Nu mai e decât un pas mic de făcut pentru a ne da seama că mişcarea are un efect la fel de spectaculos şi asupra spaţiului. Să ne întoarcem la Jim şi la Silm, pe pista de curse. Aşa cum am menţionat, la magazinul de prezentare, Slim a măsurat cu atenţie lungimea noii sale maşini folosind o ruletă. Acum Slim goneşte pe pistă, iar Jim nu poate aplica aceeaşi metodă pentru a măsura maşina, aşa că va trebui s-o măsoare indirect. După cum am arătat mai sus, el poate proceda în felul următor: îşi porneşte cronometrul exact când partea din faţă a maşinii lui Slim ajunge în dreptul său şi îl opreşte exact când partea din spate îl depăşeşte. Înmulţind timpul scurs cu viteza maşinii, Jim îi poate determina lungimea.

Folosindu-ne de nou-descoperitele şi subtilele proprietăţi ale timpului, ne dăm seama că, din perspectiva lui, Slim este în repaus, pe când Jim se mişcă; deci Slim vede că ceasul lui Jim rămâne în urmă. Slim îşi dă seama deci că măsurătoarea indirectă a lungimii maşinii făcută de Jim va avea ca rezultat o lungime mai scurtă decât cea măsurată în magazinul de prezentare, pentru că în calculele sale (lungimea este egală cu viteza înmulţită cu timpul scurs) Jim foloseşte timpul măsurat cu un ceas care merge mai încet. Dacă ceasul merge mai încet, timpul măsurat de el va fi mai scurt şi rezultatul calculelor sale va fi o distanţă mai scurtă.

Astfel, Jim va vedea că lungimea maşinii lui Slim e mai mică atunci când este în mişcare decât atunci când este în repaus. Acesta este un exemplu al fenomenului general prin care observatorii percep că un obiect în mişcare e scurtat de-a lungul direcţiei de mişcare. De

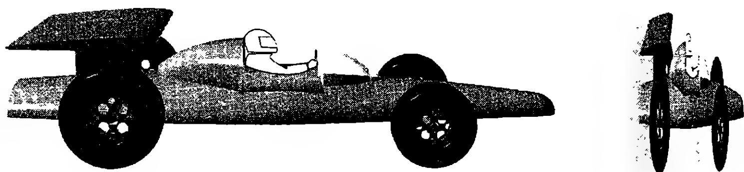


Figura 2.4. Un obiect în mişcare este scurtat de-a lungul direcţiei de mişcare.

exemplu, ecuaţiile teoriei speciale a relativităţii arată că dacă un obiect se mişcă cu o viteză de aproximativ 98% din viteza luminii, atunci pentru un observator staţionar va apărea cu 80% mai scurt decât dacă ar fi în repaus. Acest fenomen e ilustrat în figura 2.4.[10]

Mişcarea în spaţiu-timp

Valoarea constantă a vitezei luminii a condus la înlocuirea modului tradiţional de a privi spaţiul şi timpul ca pe nişte structuri rigide şi obiective cu o nouă concepţie în care acestea sunt în mod intim determinate de mişcarea relativă dintre observator şi observat. Am putea încheia discuţia aici, ştiind că obiectele în mişcare evoluează încetinit şi sunt scurtate în direcţia de mişcare. Teoria relativităţii speciale ne oferă însă o perspectivă mai profund unificată asupra acestor fenomene.

Pentru a înţelege această perspectivă, să ne imaginăm un automobil destul de nepractic ce îşi atinge rapid viteza de croazieră de 100 mile pe oră, iar apoi rămâne la această viteză constantă până când motorul este oprit, după care rulează până ajunge în repaus. Să ne mai imaginăm şi că, datorită creşterii reputaţiei sale de şofer abil, Slim este rugat să testeze acest vehicul pe o pistă lungă, dreaptă şi lată, aflată în mijlocul unei zone plate în deşert. Cum distanţa dintre linia de start şi cea de sosire este de 10 mile, maşina ar trebui s-o parcurgă într-a zecea parte dintr-o oră, adică în 6 minute. Jim, care face pe inginerul de automobile, compară datele înregistrate de la zeci de teste şi observă cu mirare că, deşi majoritatea timpilor obţinuţi erau de 6 minute, ultimele câteva teste erau semnificativ mai lungi: 6,5; 7 şi chiar 7,5 minute. La început, a crezut că e vorba de o problemă mecanică, pentru

ca timpul cronometrat părea să indice că maşina mergea cu mai puţin de 100 de mile pe oră la ultimele trei ture. Totuşi, după ce examinează în detaliu maşina, se convinge că aceasta e în perfectă stare de funcţionare. Neputând să explice anomalia timpilor mai lungi, îl consultă pe Slim cerându-i părerea despre ultimele câteva teste. Slim îi dă o explicaţie simplă. El îi spune lui Jim că, deoarece pista se întinde de la est la vest, pe măsură ce se făcea mai târziu, soarele ajungea să-i bată în ochi. La ultimele trei teste a fost atât de rău, încât a trebuit să traverseze pista sub un mic unghi. El a desenat o schiţă cu traiectoriile pe care le-a parcurs la ultimele trei ture, prezentată în figura 2.5. Explicaţia pentru cei trei timpi mai lungi devine acum clară: drumul parcurs de la linia de start la linia de sosire este mai lung când e făcut sub un anumit unghi şi deci, la aceeaşi viteză de 100 de mile pe oră, a avut nevoie de mai mult timp pentru a-l parcurge. Altfel spus, când mergi sub un anumit unghi, o parte din viteza de 100 de mile pe oră este cheltuită ca să mergi de la sud la nord, lăsând ceva mai puţină viteză disponibilă pentru călătoria de la est la vest. Din cauza aceasta, traversarea pistei va dura ceva mai mult timp.

Explicaţia lui Slim e uşor de înţeles, dar merită s-o reformulăm puţin, pentru a înlesni saltul conceptual pe care îl vom face. Direcţiile nord-sud şi est-vest sunt două dimensiuni spaţiale independente în care se mişcă maşina. (Maşina se poate mişca şi vertical, de exemplu când traversează un canion, dar aici nu ne interesează această posibilitate.) Explicaţia lui Slim arată că, în ciuda faptului că maşina a mers cu 100 de mile pe oră la fiecare cursă, în timpul ultimelor teste ea şi-a împărţit viteza între cele două dimensiuni şi din cauza asta a

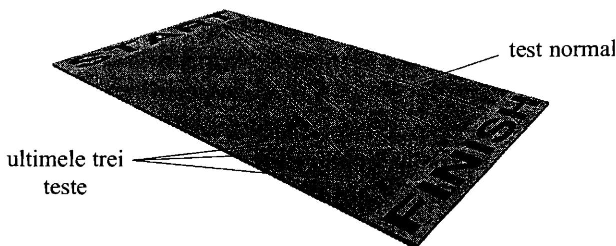


Figura 2.5. Din cauza luminii soarelui la asfinţit, Slim a condus sub unghiuri din ce în ce mai mari la ultimele trei ture.

mers cu mai puţin de 100 de mile pe oră în direcţia est-vest. În timpul curselor anterioare, cele 100 de mile pe oră erau dedicate în întregime mişcării de la est la vest; în timpul ultimelor trei teste, o parte din această viteză a fost folosită şi pentru mişcarea de la nord la sud.

Einstein a descoperit că exact această idee – împărţirea mişcării între mai multe dimensiuni – stă la baza fizicii remarcabile a teoriei speciale a relativităţii atunci când înţelegem că mişcarea unui obiect nu se împarte numai după dimensiunile spaţiale, ci însuşi *timpul* ia parte la împărţire. De fapt, în majoritatea cazurilor, *cea mai mare parte* a mişcării unui obiect are loc în timp, nu în spaţiu. Să vedem ce înseamnă asta.

Mişcarea prin spaţiu este o idee despre care aflăm în primii ani de viaţă. Deşi în general nu judecăm lucrurile în asemenea termeni, aflăm de asemenea că noi, prietenii noştri, lucrurile noastre ş.a.m.d., toate *se mişcă şi prin timp*. Dacă ne uităm la un ceas chiar şi atunci când privim nemişcaţi la televizor, afişajul ceasului se schimbă constant, se „mişcă mereu înainte în timp". Noi – şi totul din jurul nostru – îmbătrânim, trecând inevitabil de la un moment de timp la următorul. De fapt, matematicianul Hermann Minkowski şi chiar Einstein însuşi au pledat în favoarea interpretării timpului ca o altă dimensiune a universului – a patra dimensiune – într-un fel similară cu cele trei dimensiuni spaţiale în care suntem cu toţii scufundaţi. Deşi pare abstractă, noţiunea de timp perceput ca dimensiune este de fapt concretă. Când vrem să ne întâlnim cu cineva, îi spunem unde „în spaţiu" vrem să ne întâlnim – de exemplu, la etajul 9 al clădirii de la intersecţia străzii 53 cu bulevardul 7. Informaţia aceasta conţine trei date (etajul 9, strada 53 şi bulevardul 7) care specifică o anumită localizare în cele trei dimensiuni spaţiale ale universului. La fel de importantă este însă şi precizarea timpului *când* ne aşteptăm să ne întâlnim – de exemplu la 3 după-amiaza. Această informaţie ne precizează unde *în timp* va avea loc întâlnirea. Evenimentele sunt deci specificate prin patru date, trei referindu-se la spaţiu şi una la timp. Spunem că aceste date localizează evenimentul în spaţiu şi timp, sau, pe scurt, în spaţiu-timp. În acest sens, timpul este o altă dimensiune.

Din moment ce această perspectivă afirmă că spaţiul şi timpul nu sunt decât diferite exemple de dimensiuni, putem oare vorbi despre viteza unui obiect prin timp într-o manieră asemănătoare ideii de viteză prin spaţiu? Într-adevăr, putem.

Un indiciu important asupra modului în care o putem face ne este furnizat de o informație esențială, întâlnită mai sus. Când un obiect are o mișcare relativă prin spațiu față de noi, ceasul lui merge mai încet în comparație cu al nostru. Deci, viteza *mișcării lui prin timp e încetinită.* Aici se produce saltul: Einstein susține că toate obiectele din univers călătoresc *întotdeauna* prin spațiu-timp cu o viteză dată – viteza luminii. E o idee ciudată; noi suntem obișnuiți cu ideea că obiectele călătoresc cu viteze mult mai mici decât viteza luminii. Am subliniat în mod repetat că acesta este motivul pentru care efectele relativiste sunt atât de puțin familiare în viața de zi cu zi. Toate acestea sunt adevărate. Acum însă vorbim despre viteza combinată a unui obiect prin *toate cele patru* dimensiuni – trei spațiale și una termporală –, iar viteza obiectului în acest sens generalizat este egală cu viteza luminii. Pentru a înțelege pe deplin acest lucru și pentru a-i descoperi importanța, să observăm că, la fel ca la mașina cea nepractică având o singură viteză, despre care am vorbit anterior, și această viteză fixă a obiectului poate fi împărțită între diferite dimensiuni – adică diferite dimensiuni spațiale *și* timp. Dacă un obiect e în repaus (în raport cu noi) și în consecință nu se mișcă deloc prin spațiu, atunci, prin analogie cu primele curse ale mașinii, toată mișcarea obiectului este folosită pentru deplasarea într-o singură dimensiune – în acest caz, dimensiunea temporală. Mai mult, toate obiectele aflate în repaus în raport cu noi și între ele se mișcă prin timp – îmbătrânesc – cu același ritm sau viteză. Dacă însă un obiect se mișcă și prin spațiu, aceasta înseamnă că o parte din mișcarea pe care o avea prin timp trebuie deviată. Ca și mașina ce se deplasează sub un unghi, această împărțire a mișcării face ca obiectul să se deplaseze mai încet prin timp decât partenerii săi staționari, pentru că o parte din mișcarea lui e folosită acum pentru a se deplasa prin spațiu. Adică ceasul atașat lui va ticăi mai încet dacă se mișcă prin spațiu. Este exact ce am descoperit mai devreme. Observăm acum că scurgerea timpului e încetinită pentru un obiect care se mișcă în raport cu noi fiindcă o parte din mișcarea lui prin timp este transformată în mișcare prin spațiu. Deci viteza unui obiect prin spațiu arată cât din mișcarea lui prin timp a fost deviată.[11]

Vedem de asemenea că această perspectivă încorporează automat faptul că există o limită a vitezei spațiale a unui obiect: viteza maximă prin spațiu este atinsă atunci când *toată* mișcarea unui obiect prin timp este transformată în mișcare prin spațiu. Aceasta se întâmplă când toată mișcarea inițială cu viteza luminii prin timp este transformată

în mişcare cu viteza luminii prin spaţiu. Dar din moment ce şi-a folosit toată mişcarea prin timp, aceasta este viteza *cea mai mare* prin spaţiu pe care un obiect – orice obiect – o poate atinge. Această situaţie corespunde cazului în care maşina lui Slim e condusă exact pe direcţia nord-sud. La fel cum maşinii nu-i va mai rămâne viteză pentru mişcarea în direcţia est-vest, un obiect care se deplasează cu viteza luminii prin spaţiu nu va mai avea viteză pentru mişcarea prin timp. De aceea lumina nu îmbătrâneşte; un foton care a rezultat din big bang are astăzi aceeaşi vârstă pe care o avea şi atunci. Nu există scurgere a timpului la viteza luminii.

Ce este cu $E = mc^2$?

Cu toate că Einstein nu a pledat pentru numele de teoria „relativităţii“ (sugerând în schimb numele de teoria „invarianţei“ pentru a reflecta, între altele, caracterul neschimbat al vitezei luminii), sensul termenului este acum clar. Teoria lui Einstein a arătat că noţiuni ca spaţiul şi timpul, care anterior păreau independente şi absolute, sunt de fapt întrepătrunse şi relative. Einstein a continuat prin a arăta că şi alte proprietăţi fizice ale lumii în care trăim se întrepătrund în mod neaşteptat. Faimoasa lui ecuaţie oferă unul din cele mai importante exemple în acest sens. Prin ea, Einstein a arătat că energia (E) şi masa (m) unui obiect nu sunt concepte independente; putem determina energia cunoscând masa (înmulţind-o pe ultima de două ori cu viteza luminii, c^2) sau putem determina masa cunoscând energia (prin împărţirea ultimei de două ori la viteza luminii). Cu alte cuvinte, energia şi masa, precum dolarul şi euro, sunt valute convertibile. Dar, spre deosebire de cazul banilor, rata de schimb, egală cu viteza luminii la pătrat, este şi va fi mereu fixă. Cum această rată de schimb e atât de mare (c^2 este un număr mare), o masă mică poate produce multă energie. La Hiroşima lumea a înţeles puterea distructivă devastatoare rezultată din conversia în energie a mai puţin de 1% din 50 de grame de uraniu; într-o bună zi, în centralele de fuziune nucleară vom folosi formula lui Einstein pentru a satisface nevoile de energie ale întregii lumi, utilizând proviziile practic nelimitate de apă de mare.

Din punctul de vedere al conceptelor puse în evidenţă în acest capitol, ecuaţia lui Einstein dă cea mai concretă explicaţie pentru ideea

centrală că nimic nu se poate deplasa cu viteză mai mare decât cea a luminii. V-aţi întrebat probabil de ce nu putem să luăm un obiect, un miuon de exemplu, pe care un accelerator l-a accelerat până la 667 milioane de mile pe oră – 99,5% din viteza luminii – şi să-l „împingem puţin mai tare" până la 99,9% din viteza luminii, iar apoi „să-l împingem *şi mai tare*" obligându-l să treacă bariera vitezei luminii. Formula lui Einstein ne explică de ce un asemenea efort e mereu sortit eşecului. Cu cât ceva se mişcă mai rapid, cu atât energia lui creşte, iar din formula lui Einstein vedem că pe măsură ce energia creşte, şi masa lui creşte. De exemplu, miuonii care se deplasează cu 99,9% din viteza luminii cântăresc mult mai mult decât verii lor staţionari. De fapt, ei sunt de aproximativ 22 de ori mai grei. (Masele din tabelul 1.1 sunt date pentru particule în repaus). Dar cu cât un obiect este mai masiv, cu atât e mai greu să-i sporeşti viteza. Să împingi un copil pe bicicletă e una, dar să împingi un camion e cu totul altceva. Deci, când un miuon se mişcă din ce în ce mai repede, devine din ce în ce mai dificil să-i creşti viteza. La 99,999% din viteza luminii, masa miuonului creşte cu un factor de 224; la 99,99999999% din viteza luminii, ea creşte cu un factor mai mare de 70 000. Cum masa miuonului creşte fără limită, când viteza se apropie de cea a luminii, ar fi nevoie de o „împingere" cu o energie infinită pentru a atinge sau pentru a depăşi bariera vitezei luminii. Bineînţeles că acest lucru e imposibil şi, în concluzie, nimic nu se poate deplasa mai repede decât lumina.

Aşa cum vom vedea în capitolul următor, această concluzie este germenele celui de-al doilea conflict major apărut în fizică în ultimul secol şi va duce la căderea unei alte teorii venerabile şi îndrăgite – teoria gravitaţiei universale a lui Newton.

CAPITOLUL 3

Despre deformări și ondulații

Prin relativitatea specială Einstein a rezolvat conflictul dintre „intuiția veche de când lumea" privind mișcarea, pe de o parte, și viteza constantă a luminii, pe de altă parte. Pe scurt, soluția este aceea că intuiția noastră e greșită – ea s-a format pornind de la mișcarea care e în general extrem de lentă în comparație cu viteza luminii, iar aceste viteze mici ascund adevăratul caracter al spațiului și timpului. Relativitatea specială dezvăluie adevărata lor natură și arată că sunt radical diferite de concepțiile anterioare. Transformarea modului nostru de a înțelege spațiul și timpul a reprezentat o sarcină dificilă. Einstein și-a dat seama destul de curând că între numeroasele consecințe ale teoriei speciale a relativității una era deosebit de profundă: postulatul că nimic nu poate depăși lumina era incompatibil cu veneratа teorie a gravitației universale, elaborată de Newton în cea de-a doua jumătate a secolului al XVII-lea. Astfel, în timp ce rezolva un conflict, teoria relativității speciale dădea naștere altuia. După un deceniu de studiu intens, deseori chinuitor, Einstein a rezolvat dilema prin teoria generală a relativității. Cu această teorie, Einstein revoluționa din nou înțelegerea noastră asupra spațiului și timpului arătând că ele se deformează pentru a transmite forța gravitației.

Perspectiva newtoniană asupra gravitației

Isaac Newton, născut în 1642 în Lincolnshire, Anglia, a schimbat radical metodele cercetării științifice prin aducerea întregului arsenal matematic în serviciul fizicii. Spiritul lui Newton a fost atât de prolific,

încât atunci când îşi dădea seama că, de exemplu, nu exista aparatul matematic de care avea nevoie în cercetările sale, îl inventa. Vor trece aproape trei secole până când lumea va avea un geniu ştiinţific comparabil cu el. Dintre numeroasele descoperiri profunde ale lui Newton care au dezvăluit tainele universului, cea care ne interesează aici în mod deosebit este teoria universală a gravitaţiei.

Forţa gravitaţională pătrunde pretutindeni în viaţa cotidiană. Ne menţine pe noi, împreună cu toate obiectele din jurul nostru, fixaţi la suprafaţa pământului; împiedică aerul pe care îl respirăm să se răspândească în spaţiu; menţine Luna pe orbita din jurul Pământului şi Pământul pe orbita din jurul Soarelui. Gravitaţia dictează ritmul dansului cosmic executat neîncetat şi meticulos de miliarde şi miliarde de locuitori ai cosmosului, de la asteroizi la planete, stele şi galaxii. După mai bine de trei secole de influenţă a teoriilor sale, Newton ne determină să luăm ca pe o certitudine ideea că o singură forţă – gravitaţia – este răspunzătoare pentru toată diversitatea evenimentelor terestre şi extraterestre. Înainte de Newton, nimeni nu şi-a putut imagina cum căderea unui măr din copac poate fi dovada principiului fizic datorită căruia sunt menţinute planetele în rotaţie în jurul Soarelui. Făcând un pas cutezător în numele supremaţiei ştiinţifice, Newton a unificat fizica ce guverna cerul şi Pământul şi a afirmat că forţa gravitaţională e mâna invizibilă care controlează cele două tărâmuri.

Această perspectivă a lui Newton asupra gravitaţiei ar putea fi numită marea egalizare. El a declarat că absolut orice corp exercită o forţă de atracţie gravitaţională asupra oricărui alt corp. Indiferent de compoziţia fizică, *orice* corp exercită, dar şi resimte forţa gravitaţională. Bazându-se pe un studiu amănunţit al analizei întreprinse de Johannes Kepler asupra mişcării planetare, Newton a dedus că forţa de atracţie gravitaţională dintre două corpuri depinde de *exact* două lucruri: cantitatea de material ce compune fiecare dintre corpuri şi distanţa dintre ele. „Material“ înseamnă materie – cuprinde numărul total de protoni, neutroni şi electroni, care la rândul lor determină *masa* obiectului. Teoria universală a gravitaţiei elaborată de Newton susţine că forţa de atracţie gravitaţională dintre două corpuri este mai mare pentru obiecte cu masă mai mare şi mai mică pentru obiecte cu masă mai mică; de asemenea, susţine că forţa de atracţie gravitaţională este mai mare pentru distanţe mai mici între obiecte şi mai mică pentru distanţe mai mari.

Newton a mers mai departe de această descriere calitativă şi a formulat ecuaţiile ce descriu cantitativ forţa de atracţie gravitaţională dintre două corpuri. Traduse în cuvinte, aceste ecuaţii stabilesc că forţa de atracţie gravitaţională dintre două corpuri este proporţională cu produsul maselor lor şi invers proporţională cu pătratul distanţei dintre ele. Această „lege a gravitaţiei“ poate fi folosită pentru a prezice mişcarea planetelor şi a cometelor în jurul Soarelui, a Lunii în jurul Pământului, a rachetelor pornite în explorări interplanetare, dar şi pentru fenomene mai „pământeşti“, cum ar fi mingi ce zboară prin aer sau sportivi ce sar de la trambulină şi se îndreaptă rostogolindu-se spre bazinul cu apă. Concordanţa dintre predicţiile teoriei şi mişcarea reală observată a obiectelor de acest gen este spectaculoasă. Acest succes i-a conferit teoriei lui Newton un sprijin fără echivoc până la începutul secolului XX. Descoperirea de către Einstein a teoriei relativităţii speciale a ridicat totuşi în faţa teoriei lui Newton un obstacol ce s-a dovedit insurmontabil.

Incompatibilitatea dintre gravitaţia newtoniană şi teoria relativităţii speciale

O trăsătură esenţială a teoriei relativităţii speciale este limita absolută de viteză impusă de lumină. Este important să remarcăm că această limită se aplică nu numai obiectelor materiale, ci şi semnalelor şi influenţelor de orice fel. Nu există nici o posibilitate de a comunica informaţie sau vreo perturbarţie de orice tip dintr-un loc în altul cu o viteză mai mare decât viteza luminii. Există desigur nenumărate posibilităţi de a transmite perturbaţiile cu o viteză *mai mică* decât viteza luminii. De exemplu, cuvintele noastre, sau orice alte sunete, sunt transmise prin vibraţii care se deplasează prin aer cu aproximativ 700 de mile pe oră, o viteză nesemnificativă în comparaţie cu viteza de 670 de milioane de mile pe oră a luminii. Diferenţa de viteză devine evidentă când urmăreşti un joc de baseball din locuri îndepărtate de terenul de joc. Când sportivul loveşte mingea, sunetul ajunge la tine la câteva clipe *după* ce ai văzut că mingea a fost lovită. Ceva asemănător se petrece în timpul unei furtuni cu descărcări electrice. Deşi fulgerul şi tunetul sunt produse simultan, vedem fulgerul înainte de a auzi tunetul. Aceasta reflectă diferenţa substanţială de viteză dintre lumină şi sunet.

Succesul teoriei relativităţii speciale ne spune că o situaţie inversă, în care un semnal ajunge la noi înaintea luminii emise în acelaşi timp, nu e posibilă. Nimic nu-i poate depăşi pe fotoni.

Aici apare problema. În teoria newtoniană a gravitaţiei, un corp exercită o atracţie gravitaţională asupra altuia cu o forţă determinată doar de masele corpurilor şi de mărimea distanţei dintre ele. Forţa nu are nimic de-a face cu timpul cât cele două obiecte s-au aflat unul în prezenţa celuilalt. Asta înseamnă că, dacă masele sau distanţa dintre corpuri s-ar modifica, conform lui Newton, obiectele ar simţi *imediat* o schimbare în atracţia gravitaţională reciprocă. De exemplu, teoria newtoniană a gravitaţiei susţine că dacă Soarele ar exploda brusc Pământul – aflat la vreo de 93 de milioane de mile depărtare – şi-ar schimba instantaneu traiectoria, începând să se depărteze de la orbita lui eliptică obişnuită. Cu toate că luminii generate de explozie i-ar trebui 8 minute pentru a ajunge de la Soare la Pământ, în teoria lui Newton informaţia că Soarele a explodat ar fi transmisă instantaneu pe Pământ printr-o schimbare bruscă a forţei gravitaţionale care îi guvernează mişcarea.

Această concluzie este în contradicţie directă cu relativitatea specială, care ne asigură că nici o informaţie nu poate fi transmisă mai repede decât viteza lumini – transmiterea instantanee ar fi cea mai flagrantă violare a acestui concept.

Prin urmare, la începutul secolului XX, Einstein şi-a dat seama că mult preţuita teorie newtoniană a gravitaţiei era în conflict cu propria lui teorie specială a relativităţii. Având încredere în veridicitatea teoriei relativităţii speciale şi fără a putea combate muntele de dovezi experimentale ce susţineau teoria lui Newton, Einstein a căutat o nouă teorie a gravitaţiei compatibilă cu teoria specială a relativităţii. Până la urmă aceasta l-a condus la descoperirea teoriei generale a relativităţii, în care caracterul spaţiului şi timpului urmau să sufere din nou o transformare remarcabilă.

Cea mai fericită idee a lui Einstein

Chiar şi înainte de descoperirea relativităţii speciale, teoria newtoniană a gravitaţiei avea o lacună importantă. Deşi poate fi folosită pentru a face previziuni de o mare acurateţe asupra modului în care

se vor mişca obiectele sub influenţa gravitaţiei, ea nu spune ce *este* gravitaţia. Cum e posibil ca două corpuri care sunt fizic separate unul de altul, uneori la sute de milioane de mile sau mai mult, să-şi influenţeze totuşi reciproc mişcarea? Prin ce mijloace execută gravitaţia această misiune? Aceasta era o problemă de care însuşi Newton era conştient:

> Este de neconceput ca materia brută, neînsufleţită, să acţioneze şi să afecteze altă materie, fără intermedierea vreunui lucru nematerial şi fără existenţa contactului reciproc. Faptul că Gravitaţia ar trebui să fie intrinsecă, inerentă şi esenţială materiei aşa încât un corp să poată acţiona asupra altuia de la distranţă, prin vid, fără nici un fel de intermediar cu şi prin care acţiunea şi forţa să fie transmise de la unul la altul, este pentru mine o absurditate atât de mare, încât cred că nici un om înzestrat cu gândire filozofică nu o poate accepta. Gravitaţia trebuie să fie provocată de un agent care acţionează constant, în conformitate cu anumite legi; însă las la latitudinea cititorilor mei să hotărască dacă acest agent este material sau imaterial.[12]

Cu alte cuvinte, Newton a acceptat existenţa gravitaţiei şi a elaborat ecuaţiile ce descriu cu precizie efectele ei, dar nu a oferit niciodată vreo explicaţie privind felul în care funcţionează ea. El a dat lumii „manualul utilizatorului“ pentru gravitaţie, care descria modul de întrebuinţare al acesteia – instrucţiuni pe care fizicienii, astronomii şi inginerii le-au exploatat cu succes pentru a pregăti drumul rachetelor spre Lună, Marte şi alte planete ale sistemului solar; pentru a prezice eclipsele de Soare şi de Lună; pentru a prezice mişcarea cometelor şi aşa mai departe. Dar el a lăsat substratul acestor acţiuni – conţinutul „cutiei negre“ a gravitaţiei – într-un mister total. Când folosiţi CD-playerul sau calculatorul personal, puteţi fi în aceeaşi stare de ignoranţă în ceea ce priveşte modul lor de funcţionare internă. Atât timp cât ştii cum să foloseşti aparatul, nici tu şi nici altcineva nu are nevoie să ştie *cum* îndeplineşte acesta sarcinile pe care e destinat să le efectueze. Dar dacă CD-playerul sau calculatorul personal se strică, reparaţia lor necesită în mod esenţial cunoaşterea modului de funcţionare internă. În mod asemănător, Einstein a înţeles că, în pofida sutelor de ani de confirmări experimentale, teoria specială a relativităţii conducea la concluzia că exista un „defect“ subtil al teoriei lui Newton şi că „repararea“ ei presupunea dezvăluirea întregii şi adevăratei naturi a gravitaţiei.

În 1907, în timp ce medita la aceste probleme la masa lui de lucru de la biroul de brevete şi invenţii din Berna, lui Einstein i-a venit ideea principală, pornind de la care, după ajustări şi reajustări, va ajunge la o teorie a gravitaţiei radical nouă – o viziune care nu numai că va umple lacunele teoriei newtoniene, ci va reformula complet perspectiva asupra gravitaţiei şi, cel mai important, o va face într-o manieră perfect coerentă cu teoria relativităţii speciale.

Descoperirea lui Einstein este relevantă pentru o întrebare care s-ar putea să vă fi frământat în capitolul 2. Am subliniat acolo că ne preocupă să înţelegem felul în care lumea apare persoanelor aflate în mişcare relativă cu viteză constantă. Comparând cu atenţie observaţiile unor asemenea persoane, am ajuns la concluzii spectaculoase privind natura spaţiului şi timpului. Dar ce se întâmplă cu persoanele supuse mişcării *accelerate*? Observaţiile lor vor fi mai complicat de analizat decât cele ale observatorilor ce se deplasează cu viteză constantă, a căror mişcare este mai liniştită, dar ne putem întreba dacă există vreun mijloc de a cuprinde această complexitate pentru a aduce şi mişcarea accelerată în noul nostru câmp de înţelegere a spaţiului şi timpului.

„Cea mai fericită idee" a lui Einstein a arătat cum se poate face aşa ceva. Pentru a-i înţelege viziunea, să ne imaginăm că ne aflăm în anul 2050, că eşti expertul şef în explozibili al FBI-ului şi că tocmai ai fost trimis să cercetezi ceea ce pare a fi o bombă sofisticată plasată chiar în inima Washingtonului. După ce ajungi în grabă la locul indicat şi examinezi dispozitivul, cel mai cumplit coşmar al tău se confirmă: este vorba de o bombă nucleară cu o putere atât de mare, încât, chiar dacă ar fi îngropată la mare adâncime sub pământ sau scufundată în ocean, explozia ei ar fi devastatoare. După ce studiezi cu atenţie mecanismul de detonare al bombei, îţi dai seama că nu există nici o şansă să fie dezamorsată şi, în plus, observi că e prevăzută cu un nou tip de dispozitiv-capcană. Bomba este aşezată pe un cântar. Dacă valoarea indicată de scara cântarului se modifică cu mai mult de 50%, bomba va fi detonată. Cronometrul ataşat bombei arată că a mai rămas o săptămână până la explozie. Soarta a milioane de oameni se află în mâinile tale – ce faci?

După ce ai înţeles că nu există nici un loc sigur pe sau în Pământ pentru a detona dispozitivul, se pare că ai o singură soluţie: trebuie să lansezi dispozitivul departe, în spaţiul cosmic, unde explozia lui

nu va produce nici o pagubă. Prezinți această idee la una din întâlnirile echipei FBI și aproape imediat planul tău este respins de un tânăr asistent. „Există o problemă serioasă cu planul tău", spune tânărul asistent Isaac. „Când dispozitivul se va îndepărta de Pământ, greutatea lui va scădea datorită diminuării atracției gravitaționale a Pământului. Asta înseamnă că valoarea indicată de scara cântarului va scădea, provocând explozia cu mult înainte de a ajunge la o distanță sigură în spațiu." Înainte de a avea timp să te gândești la această critică, un alt tânăr asistent, pe nume Albert, sare de pe scaun: „De fapt, dacă mă gândesc bine, mai este o problemă", spune el. „Această problemă e la fel de importantă ca și cea a lui Isaac, dar ceva mai subtilă, așa că te rog să urmărești atent explicația mea." Cum ai vrea să te mai gândești o clipă la obiecția adusă de Isaac, încerci să-l reduci la tăcere pe Albert, dar, ca de obicei, când începe să vorbească, e de neoprit.

„Pentru a lansa dispozitivul în spatiul cosmic, va trebui să-l montăm pe o rachetă. Când racheta *accelerează* în sus pentru a ajunge în spațiul cosmic, valoarea indicată de scara cântarului va crește, având din nou ca rezultat detonarea prematură a dispozitivului. Partea inferioară a bombei – care e așezată pe cântar – va împinge mai tare cântarul decât atunci când dispozitivul e în repaus, la fel cum spatele tău este presat în spătarul scaunului mașinii atunci când accelerezi. Bomba va împinge cântarul la fel cum spatele tău împinge pernele scaunului mașinii. Când cântarul e împins, valoarea indicată de scară crește – iar aceasta va avea ca rezultat detonarea bombei dacă se atinge o creștere mai mare de 50%.

Îi mulțumești lui Albert pentru observație, dar nu ai ascultat atent explicația lui fiindcă te gândeai la remarca lui Isaac. Până la urmă spui cu tristețe că oricum ajunge o singură lovitură pentru a ucide ideea, iar observația evident corectă a lui Isaac a făcut deja acest lucru. Deși nu pare să existe vreo speranță, ești gata să primești noi propuneri. În acel moment, Albert are o revelație uimitoare: „Dacă mă gândesc mai bine", spune el, „nu cred că ideea ta trebuie abandonată. Observația lui Isaac privind scăderea gravitației când dispozitivul ajunge în spațiu are drept consecință faptul că scara cântarului indică o valoare *mai mică*. Observația mea că accelerarea în sus a rachetei face ca dispozitivul să împingă mai tare în cântar înseamnă că valoarea citită pe scara cântarului e *mai mare*. Considerându-le împreună, rezultă că, dacă reglăm atent accelerația rachetei în fiecare moment al zborului, aceste

două efecte *se pot anula reciproc*! Mai precis, la începutul ascensiunii, când racheta simte întreaga forță gravitațională, poate accelera, dar nu foarte mult, așa încât să rămânem în marja de plus-minus 50% din greutatea obiectului. Pe măsură ce racheta se îndepărtează de Pământ – deci simte tot mai slab gravitația Pământului – va trebui să creștem accelerarea în sus pentru a compensa efectul. Creșterea valorii indicate de cântar datorită accelerației poate echilibra perfect scăderea provocată de diminuarea forței de atracție gravitaționale, iar astfel putem face ca valoarea citită pe scara cântarului să rămână neschimbată".

Începi să înțelegeți propunerea lui Albert. „Cu alte cuvinte", îi răspunzi, „accelerația în sus poate compensa ori înlocui gravitația. Putem imita efectul gravitației printr-o mișcare accelerată corespunzătoare".

„Exact", răspunde Albert.

„Deci", spui în continuare, „*putem* lansa bomba în spațiu, iar prin reglarea judicioasă a accelerației rachetei ne putem asigura că valoarea citită pe scara cântarului rămâne neschimbată, evitând în felul acesta detonarea până când bomba ajunge la o distanță sigură față de Pământ." Astfel, compensând gravitația cu mișcarea accelerată – folosind tehnica spațială a secolului XXI – poți evita dezastrul.

Recunoașterea faptului că gravitația și mișcarea accelerată sunt profund legate este ideea-cheie pe care a avut-o Einstein în acea zi fericită, în biroul de brevete și invenții din Berna. Deși povestea bombei scoate în evidență esența ideii sale, merită s-o reformulăm într-un cadru mai apropiat de cel din capitolului 2. În acest scop, să ne aducem aminte că, dacă ne aflăm într-un compartiment de tren complet izolat și fără ferestre, care nu accelerează, nu avem nici o modalitate de a determina viteza acestuia. Compartimentul va arăta la fel, iar orice experimente am face, rezultatele ar fi aceleași, indiferent de viteza cu care ne-am deplasa. Fără existența unor repere exterioare pentru comparație, nu există nici un mijloc de a asocia o viteză cu starea noastră de mișcare. Pe de altă parte, dacă accelerăm, atunci chiar și cu percepțiile noastre limitate la compartimentul sigilat, vom simți o forță acționând asupra corpului nostru. De exemplu, dacă scaunul pe care stai, aflat cu fața în direcția de mers, este fixat de podea, iar compartimentul este accelerat înainte, vei simți forța scaunului apăsându-te în spate, la fel ca în mașina pomenită de Albert. În mod asemănător, dacă compartimentul va fi accelerat în sus, vei simți forța podelei împingându-ți picioarele. Ce a descoperit Einstein a fost

că, aflându-ne în interiorul compartimentului, nu vom fi în stare să deosebim aceste mişcări accelerate de cele în care nu există *acceleraţie*, dar există *gravitaţie*: când mărimile lor sunt reglate corespunzător, forţa pe care o simţi provocată de un câmp gravitaţional şi cea provocată de o mişcare accelerată sunt imposibil de distins. Dacă podeaua compartimentului e paralelă cu suprafaţa pământului, vom simţi forţa familiară cu care podeaua apasă asupra picioarelor noastre, la fel ca în cazul scenariului cu accelerarea în sus; este vorba de aceeaşi echivalenţă pe care a exploatat-o Albert pentru lansarea bombei teroriste în spaţiu. Dacă compartimentul este aşezat vertical în sus, vom simţi în spate forţa scaunului (împiedicându-ne să cădem), la fel ca atunci când trenul era accelerat orizontal. Einstein a numit această indiscernabilitate dintre mişcarea accelerată şi gravitaţie *principiul echivalenţei*. El joacă un rol central în teoria generală a relativităţii.[13]

Această prezentare ne arată că relativitatea generală desăvârşeşte demersul relativităţii speciale. În teoria specială a relativităţii, principiul relativităţii proclamă democraţia în rândul punctelor de vedere: legile fizicii apar identice tuturor observatorilor aflaţi în mişcare cu viteză constantă. Dar aceasta e o democraţie limitată, pentru că exclude un număr enorm de alte puncte de vedere – cele ale indivizilor acceleraţi. Ideea lui Einstein din 1907 ne arată cum putem îmbrăţişa *toate* punctele de vedere – mişcare uniformă şi mişcare accelerată – într-un cadru egalitar. Atât timp cât nu există nici o diferenţă între punctul de vedere al unui observator accelerat, *fără* câmp gravitaţional, şi un punct de vedere al unui observator fără acceleraţie, dar *cu* câmp gravitaţional, putem adopta ultima perspectivă şi declara că *toţi observatorii, indiferent de starea lor de mişcare, pot susţine că sunt staţionari şi că „restul lumii se mişcă pe lângă ei“, atât timp cât includ un câmp gravitaţional corespunzător în descrierea mediului care îi înconjoară.* În sensul acesta, prin includerea gravitaţiei, relativitatea generală ne asigură că toate punctele de vedere posibile se află pe picior de egalitate. (După cum vom vedea mai jos, asta înseamnă că diferenţele bazate pe mişcarea accelerată dintre observatorii din capitolul 2 – ca atunci când George a început s-o urmărească pe Gracie pornindu-şi propulsorul, iar în felul acesta a ajuns să îmbătrânească mai puţin decât ea – admit o descriere similară fără acceleraţie, dar incluzând gravitaţia.)

Această legătură profundă între gravitaţie şi mişcarea accelerată este, fără îndoială, o realizare remarcabilă, însă de ce oare l-a bucurat atât de mult pe Einstein? Motivul, simplu spus, este că gravitaţia e misterioasă. Ea e marea forţă omniprezentă în viaţa cosmosului, dar în acelaşi timp e insesizabilă şi eterică. Pe de altă parte, mişcarea accelerată, deşi ceva mai complicată decât mişcarea uniformă, este concretă şi tangibilă. Prin descoperirea legăturii fundamentale dintre cele două, Einstein şi-a dat seama că putea folosi felul său de a înţelege mişcarea pentru a ajunge la o înţelegere similară a gravitaţiei. Punerea în practică a acestei strategii nu a fost o sarcină uşoară nici măcar pentru geniul lui Einstein, dar până la urmă această abordare a dat roade sub forma relativităţii generale. Pentru a ajunge la acest obiectiv, Einstein a trebuit să găsească o a doua legătură în lanţul ce unifică gravitaţia şi mişcarea accelerată: *curbarea* spaţiului şi timpului, asupra căreia ne vom apleca acum.

Acceleraţia şi deformarea spaţiului şi timpului

Einstein a lucrat la problema înţelegerii gravitaţiei cu o intensitate extraordinară, aproape obsesivă. La vreo cinci ani de la revelaţia avută în biroul de brevete şi invenţii din Berna, el îi scria fizicianului Arnold Sommerfeld: „Acum lucrez numai la problema gravitaţiei [...] Un lucru e sigur – niciodată în viaţă nu m-am consumat atât [...] În comparaţie cu problema asta, teoria iniţială (specială) a relativităţii e o joacă de copil."[14]

Einstein pare să fi făcut următoarea sa descoperire-cheie, o consecinţă firească şi totuşi subtilă a aplicării relativităţii speciale la legătura dintre gravitaţie şi mişcarea accelerată, în 1912. Pentru a înţelege acest pas în raţionamentul lui Einstein, cel mai bine e să ne concentrăm, aşa cum a făcut-o şi el, asupra unui exemplu particular de mişcare accelerată.[15] Să ne aducem aminte că un obiect e accelerat dacă viteza sau direcţia mişcării sale se schimbă. Pentru simplificare, ne vom axa pe mişcarea accelerată în care *doar* direcţia mişcării obiectului se schimbă, în timp ce valoarea vitezei lui rămâne constantă. Mai precis, să considerăm mişcarea pe un cerc, ca în cazul curselor Tornada din parcurile de distracţii. Dacă încă nu v-aţi încercat robusteţea constituţiei

într-o cursă Tornada, am să vă explic despre ce e vorba. Stai cu spatele pe partea interioară a unei structuri circulare de plexiglas care se învârte cu viteză foarte mare. Aşa cum se întâmplă cu orice mişcare accelerată, simţi această mişcare – îţi simţi corpul tras radial către exteriorul cercului şi îţi simţi spatele împins spre peretele de plexiglas, menţinându-ţi astfel mişcarea pe un cerc. (De fapt, deşi nu este relevant pentru prezenta discuţie, mişcarea de rotaţie îţi fixează corpul de peretele de plexiglas cu o forţă atât de mare, încât, atunci când pragul pe care stăteai e retras, nu aluneci jos.) Dacă mişcarea e lipsită de zdruncinături şi închizi ochii, presiunea pe care o simţi în spate – ca sprijinul unui pat – poate face să te simţi aproape ca şi cum ai sta întins la orizontală. Acel „aproape" vine din faptul că simţi încă gravitaţia „verticală" obişnuită, astfel încât creierul tău nu poate fi complet păcălit. Dar dacă te-ai afla în această Tornada în spaţiul cosmic şi te-ai învârti cu o viteză corespunzătoare, te-ai simţi ca şi cum ai sta întins într-un pat obişnuit pe Pământ. Mai mult, dacă te-ai „ridica" şi ai merge de-a lungul interiorului peretelui rotitor de plexiglas, picioarele tale ar apăsa pe el aşa cum apasă pe podea când eşti pe Pământ. De fapt, staţiile spaţiale sunt proiectate să se învârtă în acest mod pentru a crea senzaţia artificială de gravitaţie în spaţiu.

După ce am folosit mişcarea accelerată din Tornada rotativă pentru a imita gravitaţia, putem să-l urmăm pe Einstein pentru a vedea cum îi apar spaţiul şi timpul cuiva care se roteşte. Raţionamentul lui, adaptat situaţiei noastre, a fost următorul: noi, observatorii staţionari, putem măsura cu uşurinţă circumferinţa, şi raza peretelui circular rotitor. De exemplu, pentru a măsura circumferinţa, putem folosi o riglă pe care o aşezăm în mod repetat – cap-coadă, cap-coadă – de-a lungul circumferinţei rotative; pentru rază folosim aceeaşi metodă, măsurând axul central, de-a lungul razei, până la peretele circular rotitor. Aşa cum ştim din geometria elementară, găsim că raportul lor este de două ori numărul pi – aproximativ 6,28 – ca pentru orice cerc desenat pe o coală de hârtie plată. Dar cum apar lucrurile din perspectiva cuiva care se află în interiorul peretelui circular rotitor?

Pentru a găsi răspunsul, îi rugăm pe Slim şi Jim, care se amuză învârtindu-se în Tornada, să facă nişte măsurători pentru noi. Îi aruncăm una din rigle lui Slim, care începe să măsoare circumferinţa cercului, şi alta lui Jim, care începe să măsoare raza. Pentru a înţelege

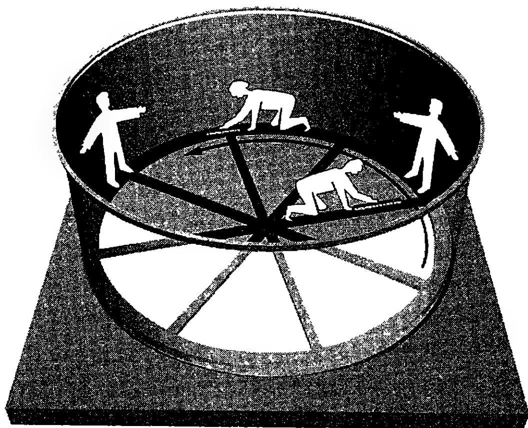


Figura 3.1. Rigla lui Slim este contractată deoarece e îndreptată de-a lungul direcției de mişcare. Rigla lui Jim este aşezată în lungul spiței radiale, perpendicular pe direcţia de mişcare, deci lungimea ei nu e contractată.

mai bine ce se întâmplă, să privim de sus, ca în figura 3.1. Săgeata din figură indică direcţia instantanee a mişcării fiecărui punct. Când Slim începe să măsoare circumferinţa, observăm imediat că el va obţine un rezultat diferit de al nostru. Când aşază rigla de-a lungul circumferinţei, observăm că *lungimea riglei este scurtată*. Cauza este contracţia Lorentz prezentată în capitolul 2, în care lungimea unui obiect scade de-a lungul direcţiei sale de mişcare. O linie mai scurtă înseamnă că va trebui s-o aşeze – cap-coadă – *de mai multe ori* pentru a parcurge întreaga circumferinţă. Cum el consideră în continuare că rigla are lungimea de un picior (neexistând mişcare relativă între Slim şi rigla sa, el percepe lungimea ei ca fiind cea obişnuită de un picior), Slim va măsura o circumferinţă *mai mare* decât cea măsurată de noi. (Dacă vi se pare paradoxal, nota 5 de la sfârşitul cărţii vă poate ajuta.)

Ce se întâmplă cu raza? Jim foloseşte aceeaşi metodă pentru a găsi raza rotativei şi observăm că va obţine acelaşi rezultat ca noi. Motivul este acela că rigla nu e îndreptată de-a lungul direcţiei instantanee de mişcare a peretelui circular rotativ (ca atunci când măsurăm circumferinţa). Ea face un unghi de nouăzeci de grade cu direcţia de mişcare, deci *nu* e contractată în lungime. Jim va găsi deci aceeaşi lungime a razei ca noi.

Dar când Slim şi Jim calculează raportul dintre circumferinţa şi raza cilindrului rotitor, ei vor obţine un număr care este mai mare decât rezultatul nostru de doi pi, circumferinţa fiind mai lungă, dar raza rămânând aceeaşi. Ciudat. Cum e posibil ca ceva de forma unui cerc să contrazică descoperirea făcută de grecii antici conform căreia pentru orice cerc acest raport are *exact* valoarea doi pi?

Iată explicaţia lui Einstein. Vechile rezultate obţinute de greci sunt adevărate pentru cercuri desenate pe o suprafaţă plată. Dar ceea ce se întâmplă cu oglinzile deformate sau curbate din parcurile de distracţii care distorsionează relaţiile dintre dimensiunile spaţiale ale imaginii tale reflectate se întâmplă şi cu un cerc trasat pe o suprafaţă deformată sau curbată; relaţiile spaţiale obişnuite vor fi distorsionate şi în cazul lui: raportul dintre circumferinţă şi rază nu va fi în general de două ori pi.

De exemplu, figura 3.2 compară trei cercuri ale căror raze sunt identice. Observăm că circumferinţele lor *nu* au aceeaşi lungime. Circumferinţa cercului din (b), desenată pe suprafaţa curbată a unei sfere, e mai mică decât circumferinţa cercului desenat pe suprafaţa plată în (a), deşi ele au aceeaşi rază. Natură curbată a suprafeţei sferei face ca liniile radiale ale cercului să conveargă uşor, la capete, unele către altele, având ca rezultat o uşoară scădere a circumferinţei cercului. Circumferinţa cercului din (c), care este desenat tot pe o suprafaţă curbată – în formă de şa – este mai mare decât cea desenată pe suprafaţa plată. Natură curbată a suprafeţei şeii face ca liniile radiale ale cercului să se depărteze uşor unele de altele, având ca rezultat o uşoară creştere a circumferinţei cercului. Aceste observaţii duc la concluzia că raportul dintre circumferinţa şi raza cercului din (b) va fi mai mic decât de două ori pi, în timp ce acelaşi raport va fi mai mare decât de două ori pi în (c). Dar această abatere de la valoarea de doi pi, în special valoarea mai mare găsită în (c), este exact ce am găsit noi pentru cilindrul rotativ Tornada. Asta l-a determinat pe Einstein să propună ideea curbării spaţiului ca explicaţie a violării geometriei „normale" euclidiene. Geometria în plan, descoperită de greci şi predată copiilor în şcoli de mii de ani, pur şi simplu nu se poate aplica unei persoane aflate într-un cilindrul rotativ. Ea e înlocuită de o generalizare în spaţiu curbat ca aceea prezentată schematic în figura 3.2 (c).[16]

Astfel, Einstein a înţeles că relaţiile spaţiale familiare codificate de greci, relaţii valabile pentru figurile din plan, cum ar fi un cerc

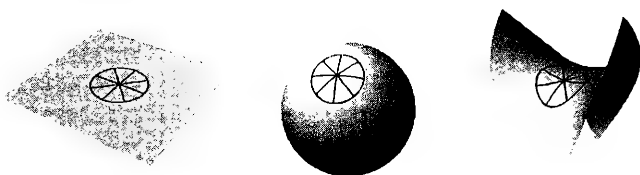


Figura 3.2. Un cerc desenat pe o sferă (b) are o circumferinţă mai mică decât un cerc desenat pe o suprafaţă plată (a), în timp ce un cerc desenat pe suprafaţa şeii (c), are o circumferinţă mai mare. Toate cercurile au aceeaşi rază.

pe o masă plată, *nu sunt valabile* din perspectiva unui observator accelerat. Evident, noi am avut în vedere un tip particular de mişcare accelerată, dar Einstein a demonstrat că un rezultat similar – curbarea spaţiului – se obţine în toate cazurile de mişcare accelerată.

De fapt, mişcarea accelerată nu are ca rezultat doar curbarea spaţiului, ci produce şi o curbare analogă a timpului. (Einstein şi-a îndreptat atenţia mai întâi asupra curbării timpului, iar abia apoi a înţeles importanţa curbării spaţiului.[17]) Dar nu trebuie să ne surprindă faptul că şi timpul e afectat, din moment ce am văzut deja în capitolul 2 că relativitatea specială impune fuziunea dintre spaţiu şi timp. Această fuziune a fost exprimată într-un limbaj inspirat de Minkowski, care în timpul unei prelegeri asupra relativităţii speciale, în 1908, a spus: „De acum înainte spaţiul şi timpul luate separat devin umbre, iar numai o anumită uniune dintre cele două îşi poate păstra independenţa."[18] Într-o exprimare mai puţin poetică, dar la fel de imprecisă, prin împletirea spaţiului şi timpului într-o structură unificată spaţio-temporală, relativitatea specială proclamă că „ce este adevărat despre spaţiu este adevărat şi despre timp". Această afirmaţie conduce însă la o întrebare: ne putem imagina că spaţiul deformat are o formă curbată, dar cum să ne imaginăm deformarea timpului?

Pentru a întrezări răspunsul, să ne folosim din nou de Slim şi Jim care se află în Tornada şi să-i rugăm să facă următorul experiment. Slim va sta cu spatele lipit de peretele rotativei, în timp ce Jim se va târî uşor spre el pe platformă pornind din centrul cilindrului. La fiecare câţiva paşi Jim se va opri, iar cei doi fraţi vor compara timpul arătat de ceasul fiecăruia. Ce vor descoperi? Din perspectiva noastră staţionară, privind scena de sus, putem anticipa răspunsul: ceasurile lor nu vor fi în concordanţă. Ajungem la această concluzie dându-ne

seama că Slim şi Jim se deplasează cu viteze diferite – pe o platformă rotitoare, cu cât eşti mai departe de centrul cercului, cu atât trebuie să te deplasezi mai mult pentru a face o rotaţie completă; prin urmare, te deplasezi mai repede. Dar, din punctul de vedere al relativităţii speciale, cu cât mergi mai repede, cu atât ceasul tău ticăie mai încet, deci ne dăm seama că ceasul lui Slim va ticăi mai încet decât al lui Jim. Mai mult, Slim şi Jim vor descoperi că, pe măsură ce Jim se apropie de Slim, ritmul cu care ticăie ceasului lui Jim va încetini, apropiindu-se de ritmul ceasului lui Slim. Asta reflectă faptul că, pe măsură ce Jim se îndepărtează de axul de rotaţie, viteza lui pe cerc va creşte, apropiindu-se de cea a lui Slim.

Tragem de aici concluzia că pentru observatorii dintr-un cilindru rotativ, aşa cum sunt Slim şi Jim, ritmul trecerii timpului depinde de poziţia lor exactă – în acest caz, de distanţa lor până la centrul cilindrului. Aceasta este o ilustrare a ceea ce înseamnă deformarea timpului: timpul este deformat dacă ritmul scurgerii lui diferă de la un loc la altul. Şi, fapt deosebit de important pentru discuţia de faţă, Jim va mai observa ceva în timp ce se târăşte de-a lungul platformei. El va simţi o împingere spre exterior din ce în ce mai mare pentru că nu numai viteza înregistrează o creştere, dar şi acceleraţia creşte pe măsură ce se îndepărtează de centrul cercului. Vedem deci că, în Tornada, acceleraţii mai mari corespund unor ceasuri mai lente – adică la acceleraţii mai mari deformarea timpului este mai puternică.

Aceste observaţii l-au condus pe Einstein spre pasul decisiv. Cum el arătase deja că gravitaţia şi mişcarea accelerată nu pot fi efectiv deosebite, iar acum demonstrase că mişcare accelerată este asociată cu deformarea spaţiului şi timpului, a făcut următoarea presupunere cu privire la conţinutul „cutiei negre“ a gravitaţiei – mecanismul prin care aceasta acţionează. Gravitaţia, după Einstein, *este* deformarea spaţiului şi timpului. Să vedem ce înseamnă asta.

Bazele relativităţii generale

Pentru a înţelege mai bine această nouă perspectivă asupra gravitaţiei, să considerăm situaţia tipică a unei planete, cum ar fi Pământul, care se roteşte în jurul unei stele, cum ar fi Soarele. Conform gravitaţiei newtoniene, Soarele menţine Pământul pe orbită cu ajutorul unei

„funii" gravitaţionale neidentificate care ajunge instantaneu, străbătând mari distanţe prin spaţiu, la Pământ şi îl „agaţă" (iar, în mod asemănător, Pământul „agaţă" Soarele). Einstein a oferit o nouă explicaţie pentru ceea ce se întâmplă. În prezentarea abordării lui Einstein ne va fi de folos un model vizual concret al spaţiu-timpului cu care să putem opera mai uşor. Astfel, vom simplifica lucrurile în două privinţe. Mai întâi, pentru moment, vom ignora timpul şi ne vom concentra atenţia doar asupra unui model vizual al spaţiului. Vom readuce mai târziu timpul în discuţia noastră. Apoi, pentru a putea desena şi folosi imaginile pe paginile acestei cărţi, vom face destul de des apel la un analog bidimensional al spaţiului tridimensional. Majoritatea concluziilor pe care le vom trage pe baza acestui model cu o dimensiune în minus sunt direct aplicabile la scenariul fizic tridimensional, deci modelul mai simplu oferă o metodă pedagogică eficientă.

În figura 3.3 folosim aceste simplificări pentru a avea un model bidimensional al unei regiuni spaţiale din universul nostru. Structura de grilă oferă un mijloc convenabil de precizare a poziţiei, la fel cum folosind reţeaua de străzi putem specifica un anume loc într-un oraş. Bineînţeles că într-un oraş adresa se dă prin precizarea poziţiei în reţeaua bidimensională a străzilor şi, de asemenea, prin precizarea poziţiei pe verticală, adică numărul etajului. Este vorba deci de ultima informaţie, poziţia în a treia dimensiune spaţială, pe care analogia noastră bidimensională o suprimă în vederea obţinerii clarităţii vizuale.

În absenţa oricărei materii sau energii, Einstein a considerat că spaţiul ar fi *plat*. Conform modelului nostru bidimensional, asta înseamnă

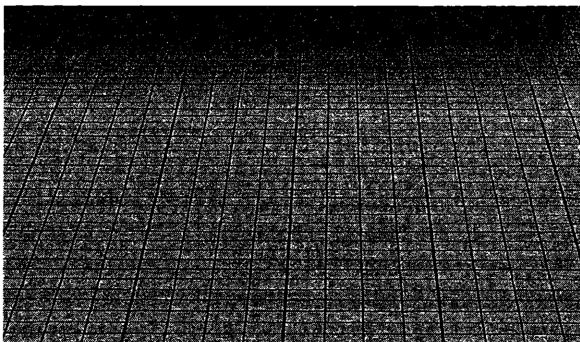


Figura 3.3. O reprezentare schematică a spaţiului plat.

că „forma“ spațiului ar trebui să fie asemeni suprafeței unei mese netede, așa cum apare în figura 3.3. Aceasta e imaginea pe care am avut-o despre universul nostru spațial timp de mii de ani. Dar ce se întâmplă cu spațiul dacă este prezent un obiect masiv precum Soarele? Înainte de Einstein răspunsul era *nimic*; se credea că spațiul (și timpul) oferă doar un fundal inert – scena pe care se jucau evenimentele universului. Raționamentele lui Einstein, pe care le-am urmărit deja, conduc însă la o concluzie diferită.

Un corp masiv cum e Soarele, și de fapt orice corp, exercită o forță gravitațională asupra celorlalte obiecte. În exemplul cu bomba teroristă am văzut că nu se poate face o distincție între forțele gravitaționale și mișcarea accelerată. Din exemplul cu platforma rotitoare Tornada am aflat că o descriere matematică a mișcării accelerate *necesită* relațiile unui spațiu curbat. Aceste legături dintre gravitație, mișcarea accelerată și spațiul curbat l-au condus pe Einstein la concluzia remarcabilă că prezența unei mase, așa cum e Soarele, face ca textura spațiului din jurul ei să se deformeze ca în figura 3.4. O analogie folositoare și des întrebuințată este aceea dintre deformarea unei membrane de cauciuc atunci când este plasată o bilă de popice pe ea și deformarea texturii spațiale datorată prezenței unui obiect masiv precum Soarele. Conform acestei propuneri radicale, spațiul nu mai este doar un cadru pasiv în care se desfășoară evenimentele universului; forma spațiului se schimbă, *răspunzând* obiectelor prezente.

Această deformare, la rândul ei, afectează obiectele ce se mișcă în vecinătatea Soarelui, ele trebuind să traverseze acum textura spațială

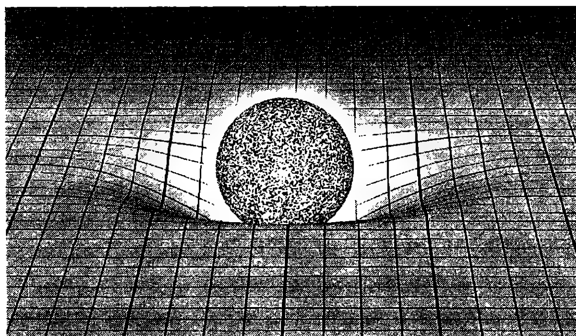


Figura 3.4. Un obiect masiv, de pildă Soarele, produce deformarea texturii spațiale, asemănător cazului unei bile de popice plasate pe o membrană de cauciuc.

deformată. Folosindu-ne de analogia bilei de popice plasate pe membrană, dacă plasăm un mic rulment pe membrană şi îi dăm drumul cu o anumită viteză iniţială, drumul pe care îl va urma depinde de prezenţa sau absenţa bilei de popice din centru. Dacă bila e absentă, membrana de cauciuc va fi plată şi rulmentul se va deplasa în linie dreaptă. Dacă bila e prezentă, şi deci deformează membrana, rulmentul se va deplasa de-a lungul unui drum curbat. De fapt, dacă ignorăm frecarea şi dacă dăm drumul rulmentului cu o viteză iniţială potrivită în direcţia potrivită, el va continua să se mişte pe o traiectorie recursivă în jurul bilei de popice – adică va „intra pe orbită". Însuşi limbajul folosit aici anticipează analogia cu gravitaţia.

Soarele, ca şi bila de popice, deformează textura spaţiului din jurul lui, iar mişcarea Pământului, ca aceea a rulmentului, este determinată de forma distorsiunii. Pământul, ca şi rulmentul, se va mişca pe orbită în jurul Soarelui dacă viteza lui are valoarea şi orientarea potrivite. Acest efect asupra mişcării Pământului este ceea ce am numi în mod normal influenţa gravitaţională a Soarelui şi este ilustrat în figura 3.5. Diferenţa acum este aceea că, spre deosebire de Newton, Einstein a identificat *mecanismul* prin care se transmite gravitaţia: deformarea spaţiului. Din punctul de vedere al lui Einstein, „funia" gravitaţională care menţine Pământul pe orbită nu este vreo acţiune instantanee şi misterioasă a Soarelui; ea este, de fapt, deformarea texturii spaţiale datorată prezenţei Soarelui.

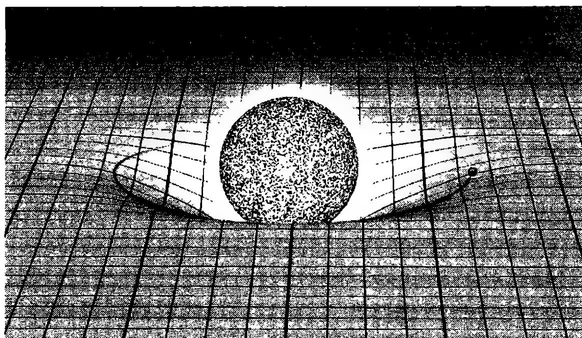


Figura 3.5. Pământul este menţinut pe orbită în jurul Soarelui pentru că se rostogoleşte de-a lungul unei văi din textura spaţiului deformat. Într-un limbaj mai precis, urmează „traiectoria de minimă rezistenţă" în regiunea deformată din jurul Soarelui.

Figura ne permite să înțelegem cele două caracteristici esențiale ale gravitației într-un nou mod. Mai întâi, cu cât e mai masivă bila de popice, cu atât va fi mai mare şi deformarea provocată de ea în membrana de cauciuc; în mod asemănător, în descrierea dată de Einstein gravitației, cu cât obiectul e mai masiv, cu atât va fi mai mare și deformarea provocată de el în spațiul înconjurător. Asta înseamnă că, cu cât obiectul e mai masiv, cu atât va fi mai mare influența gravitațională pe care o exercită el asupra altor corpuri, în perfect acord cu experiența noastră. În al doilea rând, aşa cum deformarea membranei de cauciuc datorată bilei de popice devine mai mică pe măsură ce ne îndepărtăm de ea, la fel şi deformarea spațiului datorată unui corp masiv, cum este Soarele, scade cu creşterea distanței față de el. Aceasta, din nou, este în concordanță cu ceea ce ştim despre gravitație, a cărei influență slăbeşte cu creşterea distanței dintre obiecte.

Un aspect important ce trebuie observat este acela că și rulmentul la rândul lui deformează membrana de cauciuc, dar această deformație este mult mai mică. În mod asemănător, Pământul, fiind la rândul lui un corp masiv, deformează textura spațiului, chiar dacă mult mai puțin decât Soarele. În limbajul relativității generale, aceasta e modalitatea prin care Pământul menține Luna pe orbită şi, de asemenea, ne ține pe fiecare dintre noi la suprafața sa. Când un paraşutist plonjează spre Pământ, el va aluneca de-a lungul unei depresiuni din textura spațiului produsă de masa Pământului. În plus, fiecare dintre noi – ca orice alt obiect masiv – deformează textura spațiului din imediata vecinătate, dar masa relativ mică a unui corp uman face ca această deformare să fie infimă.

Deci, în esență, Einstein a fost în acord cu afirmația lui Newton că „gravitația trebuie să fie produsă de un agent“ şi a acceptat provocarea acestuia care lăsa stabilirea identității agentului „la latitudinea cititorilor“. În conformitate cu cele demonstrate de Einstein, agentul gravitației este textura cosmosului.

Câteva obiecții

Analogia cu membrana de cauciuc şi bila de popice este prețioasă pentru că ne oferă o imagine vizuală prin care putem înțelege ce înseamnă

o deformare în textura spaţială a universului. Fizicienii folosesc adeseori această imagine şi alte analogii similare pentru a-şi călăuzi propria intuiţie privind gravitaţia şi curbarea spaţiului. Dar, în ciuda utilităţii ei, analogia nu este perfectă, şi pentru lămurire vă supun atenţiei unele dintre neajunsurile ei.

În primul rând, când Soarele face ca textura spaţiului din jur să se deformeze, aceasta nu se produce în urma „tragerii lui în jos" datorată gravitaţiei, ca în cazul bilei de popice care deformează membrana de cauciuc pentru că este atrasă spre Pământ de gravitaţie. În cazul Soarelui nu există nici un alt obiect care „să-l atragă". În schimb, Einstein ne-a învăţat că deformarea spaţiului *este* gravitaţie. Simpla prezenţă a unui obiect masiv face ca spaţiul să reacţioneze deformându-se. La fel, Pământul nu este ţinut pe orbită din cauza forţei gravitaţionale exercitate de un obiect extern, care îl ghidează de-a lungul văilor din spaţiul înconjurător deformat, aşa cum se întâmplă în cazul rulmentului aflat pe membrana de cauciuc deformată. Einstein ne-a demonstrat că obiectele se mişcă prin spaţiu (prin spaţiu-timp, mai precis) de-a lungul celor mai scurte traiectorii posibile – traiectoriile „cele mai uşoare" sau traiectoriile „de minimă rezistenţă". Dacă spaţiul este deformat, asemenea traiectorii vor fi curbate. Astfel, deşi modelul membranei de cauciuc şi al bilei de popice ne oferă o analogie vizuală bună asupra modului în care un obiect precum Soarele deformează spaţiul din jurul său şi prin asta influenţează mişcarea altor corpuri, mecanismul fizic prin care apar aceste distorsiuni este total diferit în cele două cazuri. Primul caz apelează la intuiţia noastră privind gravitaţia

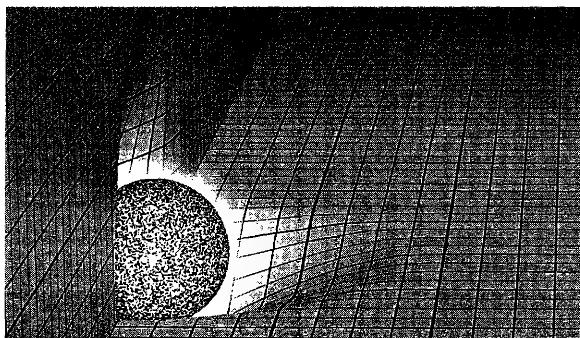


Figura 3.6 O mostră a spaţiului tridimensional deformat din jurul Soarelui.

în cadru tradițional, newtonian, în timp ce al doilea reprezintă o reformulare a gravitației în termenii spațiului curbat.

Un al doilea neajuns al analogiei pornește de la bidimensionalitatea membranei de cauciuc. În realitate, deși este mai greu de vizualizat, Soarele (și toate celelalte obiecte masive) deformează spațiul tridimensional din jurul lui. Figura 3.6 este o încercare aproximativă de a reprezenta acest fapt; întreg spațiul din jurul Soarelui – „dedesupt", „lateral" și „deasupra" – este supus aceluiași tip de distorsiune, iar figura 3.6 prezintă schematic o mostră parțială. Un corp precum Pământul se deplasează *prin* spațiul tridimensional deformat datorită prezenței Soarelui. S-ar putea să intrige această figură – de ce Pământul nu se izbește de partea verticală a spațiului curbat din imagine? Să ținem minte totuși că spațiul, spre deosebire de membrana de cauciuc, nu este o barieră solidă. Grilele deformate din imagine sunt doar niște felii subțiri din spațiul tridimensional curbat, în care tu, Pământul și toate celelalte lucruri sunt complet scufundate și se mișcă liber. Ți-ai putea închipui că acest lucru complică problema: de ce nu simțim spațiul dacă suntem scufundați în textura lui? De fapt, îl simțim. Simțim gravitația, iar spațiul este mediul prin care forța gravitațională e transmisă. După cum spunea eminentul fizician John Wheeler despre gravitație, „masa îi spune spațiului cum să se curbeze, spațiul îi spune masei cum să se miște"[19].

Un al treilea neajuns al analogiei este faptul că am suprimat dimensiunea temporală. Am făcut-o pentru claritate vizuală, deoarece, în ciuda propunerii relativității speciale de a privi dimensiunea temporară ca pe oricare din celelalte trei dimensiuni spațiale familiare nouă, este mult mai greu să „vedem" timpul. Dar, așa cum ilustrează exemplul platformei rotitoare Tornada, accelerația – deci și gravitația – deformează *atât spațiul, cât și timpul*. (De fapt ecuațiile relativității generale ne arată că în cazul unui corp cu o mișcare relativ lentă, ca Pământul rotindu-se în jurul unei stele obișnuite cum e Soarele, deformarea timpului are un impact mult mai mare asupra mișcării lui decât deformarea spațiului.) Vom reveni la discuția privind deformarea timpului după secțiunea următoare.

Dacă avem în vedere aceste trei obiecții, putem accepta imaginea spațiului deformat oferită de bila de popice pe membrana de cauciuc ca rezumând intuitiv noua viziune a lui Einstein asupra gravitației.

Rezolvarea contradicţiei

Prin introducerea spaţiului şi timpului ca jucători activi, Einstein a oferit o imagine conceptuală clară asupra modului cum acţionează gravitaţia. Întrebarea principală este totuşi dacă această reformulare a forţelor gravitaţionale rezolvă contradicţia dintre relativitatea specială şi teoria gravitaţiei newtoniene. Răspunsul este da. Din nou, analogia cu membrana de cauciuc ne dă ideea de bază. Să ne imaginăm că avem un rulment care se rostogoleşte în linie dreaptă pe o membrană plană, în absenţa bilei de popice. Când plasăm bila pe membrană, mişcarea rulmentului va fi afectată, dar *nu instantaneu*. Dacă am filma ce se întâmplă şi apoi am revedea filmul cu încetinitorul, am observa că perturbaţia datorată apariţiei bilei de popice se transmite ca undele pe suprafaţa unui lac şi ajunge în cele din urmă şi la rulment. După un timp scurt, oscilaţiile tranzitorii de-a lungul suprafeţei de cauciuc se vor amortiza, lăsând în urmă o membrană statică deformată.

Acelaşi lucru e valabil şi pentru textura spaţiului. Când nu este prezentă nici o masă, spaţiul e plat şi un obiect mic poate sta liniştit în repaus sau se poate deplasa cu viteză constantă. Dacă o masă mare intră în scenă, spaţiul se va deforma – dar, ca şi în cazul membranei, distorsiunea nu va fi instantanee. Ea se va transmite de la corpul masiv în toate direcţiile, ajungând în final la o formă distorsionată fixă ce va comunica atracţia gravitaţională a noului corp. Conform analogiei noastre, perturbaţiile membranei se deplasează de-a lungul suprafeţei cu o viteză dictată de compoziţia materialului din care e alcătuită. În cadrul real al relativităţii generale, Einstein a putut calcula viteza cu care se deplasează perturbaţiile în textura universului şi a găsit că această viteză este *exact viteza luminii*. De aici rezultă că în exemplul discutat mai devreme, în care explozia Soarelui influenţează Pământul prin schimbarea caracteristicilor interacţiei gravitaţionale reciproce, influenţa nu va fi transmisă instantaneu. Când un obiect îşi schimbă poziţia sau când explodează, el produce o schimbare în deformarea texturii spaţiului care se transmite în toate direcţiile cu viteza luminii, rămânând astfel în acord cu limita de viteză a relativităţii speciale. Prin urmare, noi, cei de pe Pământ, am percepe vizual distrugerea Soarelui în acelaşi moment în care am simţi şi consecinţele gravitaţionale ale distrugerii sale – asta s-ar întâmpla cam la 8 minute de la

explozie. Formularea lui Einstein rezolvă deci conflictul; perturbațiile gravitaționale țin pasul cu fotonii, dar nu îi depășesc.

Din nou despre deformarea timpului

Ilustrații ca acelea din figurile 3.2, 3.4 și 3.6 captează esența a ceea ce înseamnă „spațiu curbat". O îndoire distorsionează forma spațiului. Fizicienii au inventat imagini analoage pentru a încerca să sugereze înțelesul „deformării timpului", dar ele sunt cu mult mai greu de înțeles, așa încât nu le vom prezenta aici. În schimb, să urmărim mai departe exemplul în care Slim și Jim se află în Tornada rotitoare și să încercăm să înțelegem cum se resimte deformarea timpului indusă gravitațional.

Pentru aceasta, să ne întoarcem la George și Gracie, care nu se mai află în întunericul profund al spațiului cosmic, ci plutesc la marginea sistemului solar. Ei poartă încă ceasurile digitale mari, atașate de costumele lor spațiale, care sunt inițial sincronizate. Pentru a nu complica lucrurile, vom ignora efectele planetelor și vom lua în considerare doar câmpul gravitațional al Soarelui. Să ne imaginăm că o navă spațială care plutește lângă George și Gracie a desfășurat un cablu lung care ajunge până în vecinătatea suprafeței Soarelui. George folosește acest cablu pentru a coborî spre Soare. În cursul coborârii, el se oprește periodic pentru a compara cu Gracie ritmul în care timpul se scurge pe ceasurile lor. Deformarea timpului prezisă de relativitatea generală a lui Einstein implică faptul că ceasul lui George va merge din ce în ce mai încet în comparație cu al lui Gracie, pe măsură ce câmpul gravitațional în care se află devine din ce în ce mai intens. Cu alte cuvinte, cu cât se apropie mai mult de Soare, cu atât ceasul lui merge mai încet. Acesta este sensul în care gravitația deformează atât timpul, cât și spațiul.

Observați că, spre deosebire de cazul din capitolul 2 în care George și Gracie se aflau în spațiul cosmic vid mișcându-se cu viteză constantă unul față de altul, în exemplul acesta nu mai există o simetrie între ei. George, spre deosebire de Gracie, *simte* forța gravitațională din ce în ce mai puternic – pe măsură ce se apropie de Soare, el trebuie să se țină din ce în ce mai tare de cablu pentru a evita să fie smuls. Ambii observatori sunt de acord că ceasul lui George rămâne în urmă.

Aici nu există „perspective la fel de valabile" care prin inversarea rolurilor să inverseze această concluzie. De fapt, aceasta este situaţia pe care am întâlnit-o în capitolul 2, când George simţea acceleraţia datorată propulsorului pornit pentru a o ajunge din urmă pe Gracie. Acceleraţia simţită de George a avut ca rezultat rămânerea în urmă a ceasului său în raport cu cel al lui Gracie. Cum noi ştim deja că senzaţia mişcării accelerate este aceeaşi cu cea a forţei gravitaţionale, situaţia actuală în care George se ţine de cablu implică acelaşi principiu, şi din nou vom observa că ceasul lui George şi toate celelalte acţiuni ale vieţii lui au fost încetinite în comparaţie cu cele ale lui Gracie.

Într-un câmp gravitaţional ca acela de la suprafaţa unei stele tipice cum e Soarele, încetinirea ceasurilor este destul de mică. Dacă Gracie se află la un miliard de mile depărtare de Soare, iar George coboară până la numai câteva mile distanţă de suprafaţa lui, ritmul ceasului său va fi aproximativ 99,9998% din ritmul ceasului lui Gracie. Mai lent, dar nu cu mult.[20] Dacă însă George ar coborî pe cablu până la suprafaţa unei stele neutronice a cărei masă, aproximativ egală cu masa Soarelui, este strivită de o densitate de câteva milioane de miliarde de ori mai mare decât cea a Soarelui, câmpul gravitaţional mai mare ar face ca ceasul lui să ticăie cu aproximativ 76% mai rar decât ceasul lui Gracie. Câmpuri gravitaţionale mai intense, ca acelea de la suprafaţa unei găuri negre (după cum vom vedea în continuare), determină încetinirea şi mai accentuată a curgerii timpului; câmpuri gravitaţionale mai intense produc deformări mai mari ale timpului.

Verificarea experimentală a relativităţii generale

Majoritatea celor care studiază relativitatea generală sunt captivaţi de eleganţa ei. Prin înlocuirea modului de a privi spaţiul, timpul şi gravitaţia din perspectiva teoriei reci, mecaniciste, a lui Newton, cu descrierea geometrică dinamică a spaţiului-timp curbat, Einstein a înterţesut gravitaţia în textura fundamentală a universului. În loc să fie impusă ca o structură suplimentară, gravitaţia a devenit parte integrantă din univers la cel mai profund nivel al său. Viaţa care pulsează în spaţiu şi timp, permiţându-le să se curbeze, să se înfăşoare şi să se onduleze, poartă numele comun de gravitaţie.

Lăsând la o parte estetica, testul suprem al unei teorii fizice este capacitatea ei de a explica şi de a prezice cu exactitate fenomene fizice. Încă de la apariţia ei, la sfârşitul anilor 1600, şi până la începutul acestui secol, teoria gravitaţiei newtoniene a trecut acest test cu brio. Fie că a fost aplicată mingilor aruncate în sus prin aer, obiectelor lăsate să cadă din turnuri, cometelor care vâjâie în jurul Soarelui sau planetelor care se rotesc pe orbitele lor, teoria lui Newton oferă explicaţii extrem de precise asupra tuturor observaţiilor, precum şi previziuni ce au fost verificate de nenumărate ori într-o mare diversitate de situaţii. Aşa cum am subliniat, motivul pentru care a fost pusă la îndoială această teorie care a repurtat atâtea succese în faţa experimentelor a fost proprietatea ei de a transmite instantaneu forţa gravitaţională, în contradicţie cu teoria relativităţii speciale.

Deși sunt esenţiale pentru o înțelegere fundamentală a spațiului, timpului şi mişcării, efectele relativităţii speciale sunt extrem de slabe în această lume a vitezelor mici în care trăim. În mod asemănător, diferențele dintre relativitatea generală a lui Einstein – o teorie a gravitaţiei compatibilă cu relativitatea specială – şi teoria gravitației newtoniene sunt de asemenea extrem de mici în majoritatea situaţiilor întâlnite. E un lucru bun, dar şi un lucru rău. Este bine pentru că orice teorie care intenționează să înlocuiască teoria gravitației newtoniene ar trebui să fie în concordanţă cu ea când o aplicăm acelor situații în care teoria lui Newton a fost verificată experimental. Este rău pentru că din punct de vedere experimental e foarte greu să tranşăm în favoarea uneia din ele. Pentru a distinge între teoria lui Newton şi cea a lui Einstein sunt necesare măsurători extrem de precise în experimente foarte sensibile la diferențele dintre cele două teorii. Dacă aruncați o minge de baseball, puteți prezice locul unde ea va cădea folosind atât gravitația newtoniană, cât și teoria a lui Einstein, iar răspunsurile vor fi diferite, dar diferențele vor fi atât de mici, încât nu pot fi măsurate experimental. Era nevoie de un experiment mai ingenios, iar Einstein a găsit unul.[21]

Noi vedem stelele noaptea, dar bineînțeles că ele se află acolo și pe timpul zilei. Nu le vedem pentru că lumina lor îndepărtată și punctiformă este covârşită de lumina emisă de Soare. În timpul unei eclipse solare însă, Luna obturează temporar lumina solară, iar stelele îndepărtate redevin vizibile. Dar prezenţa Soarelui mai are încă un efect. Lumina provenind de la unele stele îndepărtate trebuie să treacă prin

apropierea Soarelui în drumul ei spre Pământ. Relativitatea generală a lui Einstein prezice că Soarele face ca spaţiul şi timpul din jurul său să se curbeze, iar o asemenea distorsiune *va influenţa drumul razei de lumină*. La urma urmei, fotonii care vin din regiuni îndepărtate călătoresc de-a lungul texturii universului; dacă textura este deformată, atunci şi mişcarea fotonilor va fi afectată la fel ca în cazul unui corp material. Devierea drumului luminii este maximă pentru acele raze luminoase care trec chiar pe lângă Soare în drumul lor spre Pământ. O eclipsă solară face cu putinţă vizualizarea unor asemenea raze de lumină stelară care „şterg“ în trecere Soarele, nelăsând ca ele să fie complet ascunse de lumina Soarelui.

Unghiul cu care este deviată raza de lumină se poate măsura printr-o modalitate simplă. Devierea razei de lumină a stelei duce la schimbarea poziţiei *aparente* a stelei. Această schimbare poate fi măsurată cu precizie prin compararea poziţiei aparente cu poziţia adevărată a stelei, cunoscută din observaţiile făcute asupra ei în timpul nopţii (în absenţa influenţei deformatoare a Soarelui), când Pământul se află într-o poziţie propice, aproximativ şase luni mai devreme sau mai târziu. În noiembrie 1915, Einstein a folosit noua teorie a gravitaţiei pentru a calcula unghiul sub care vor fi deviate semnalele luminoase ale stelelor care ating Soarele în drumul spre Pământ, iar rezultatul obţinut a fost de 0,00049 dintr-un grad (1,75 secunde de arc; o secundă de arc este 1/3600 dintr-un grad). Acest unghi minuscul este egal cu acela subîntins de o monedă plasată vertical şi privită de la aproximativ două mile depărtare. Detectarea unui unghi atât de mic era însă accesibilă tehnologiei acelor vremuri. La îndemnurile lui Sir Frank Dyson, directorul observatorului din Greenwich, Sir Arthur Eddington, astronom de renume şi secretar al Societăţii Regale de Astronomie din Anglia, a organizat o expediţie în insula Principe, pe coasta de vest a Africii, pentru a testa predicţiile lui Einstein în timpul eclipsei solare din 29 mai 1919.

Pe 6 noiembrie 1919, după aproximativ cinci luni de analize ale fotografiilor făcute în timpul eclipsei solare în Principe (şi ale altor fotografii ale eclipsei obţinute de o altă echipă britanică condusă de Charles Davidson şi Andrew Crommelin în Sobral, Brazilia), într-o conferinţă comună a Societăţii Regale şi a Societăţii Regale de Astronomie s-a anunţat că predicţiile lui Einstein, bazate pe teoria generală a relativităţii, au fost confirmate. Curând, vestea despre acest succes – o

schimbare radicală a concepțiilor anterioare asupra spațiului și timpului – a depășit granițele comunității științifice, făcând din Einstein o celebritate mondială. Ziarul londonez *Times* din 7 noiembrie 1919 titra: „REVOLUȚIE ÎN ȘTIINȚĂ – NOUĂ TEORIE A UNIVERSULUI – PRĂBUȘIREA IDEILOR NEWTONIENE".[22] Era momentul de glorie al lui Einstein.

În anii ce au urmat acestui experiment, confirmarea adusă de Eddington teoriei generale a relativității a fost atent cercetată critic. Numeroase aspecte dificile și subtile ale măsurătorilor le-au făcut greu de reprodus și au pus sub semnul întrebării credibilitatea experimentului inițial. Totuși, în ultimii 40 de ani, grație progresului tehnic, o mulțime de experimente au testat cu mare precizie numeroase aspecte ale teoriei generale a relativității. Predicțiile teoriei generale a relativității au fost unanim confirmate. Nu mai există nici un dubiu asupra faptului că descrierea gravitației dată de Einstein este nu numai compatibilă cu teoria specială a relativității, dar face predicții mai apropiate de rezultatele experimentale decât teoria newtoniană.

Găurile negre, marea explozie și expansiunea universului

În timp ce relativitatea specială se manifestă mai pregnant în cazul obiectelor care se mișcă cu viteze mari, relativitatea generală capătă o importanță critică atunci când obiectele sunt foarte masive și deci deformările spațiului și timpului sunt mari. Să prezentăm două exemple.

Primul se referă la o descoperire a astronomului german Karl Schwarzschild din 1916 în timp ce studia revelațiile lui Einstein asupra gravitației și făcea în paralel propriile sale calcule de artilerie, pe frontul rusesc, în Primul Război Mondial. Remarcabil este faptul că, la numai câteva luni după ce Einstein a încheiat lucrul la teoria generală a relativității, Schwarzschild putea deja să utilizeze această teorie pentru înțelegerea completă și exactă a modului în care spațiul și timpul se deformează în vecinătatea unei stele perfect sferice. Schwarzschild i-a trimis lui Einstein de pe frontul rusesc rezultatele sale, iar acesta le-a prezentat, în numele lui Schwarzschild, Academiei Prusace.

În afară de faptul că a confirmat şi a descris riguros matematic deformarea spaţiului, ilustrată schematic în figura 3.5, lucrarea Schwarzschild – care acum este cunoscută sub numele de „soluţia lui Schwarzschild“ – a scos la iveală o consecinţă uluitoare a relativităţii generale. El a arătat că dacă masa unei stele e concentrată într-o regiune sferică suficient de mică, aşa încât masa împărțită la raza ei să depăşească o anumită valoare critică, deformarea spaţio-temporală rezultată este atât de radicală, încât *nici un lucru* – nici măcar lumina – care se apropie prea mult de stea nu poate scăpa de atracția ei gravitaţională. Cum nici lumina nu poate scăpa unor asemenea „stele comprimate“, ele au fost inițial numite *stele înghețate* sau *întunecate*. Un nume mult mai interesant le-a găsit, ceva mai târziu, John Wheeler, care le-a numit *găuri negre* – negre, fiindcă nu pot emite lumină, găuri, fiindcă orice se apropie prea mult cade înăuntru pentru a nu se mai întoarce niciodată. Denumirea s-a impus.

În figura 3.7 este ilustrată soluţia lui Schwarzschild. Deşi găurile negre sunt renumite pentru rapacitatea lor, obiectele ce trec pe lângă ele la distanţă „sigură“ sunt deviate la fel cum ar fi deviate de o stea obişnuită, după care îşi văd liniştite de drum. Dar obiectele, indiferent de compoziția lor, care se apropie prea mult de stea – mai aproape de ceea ce a fost numit *orizontul evenimentelor* găurii negre – sunt

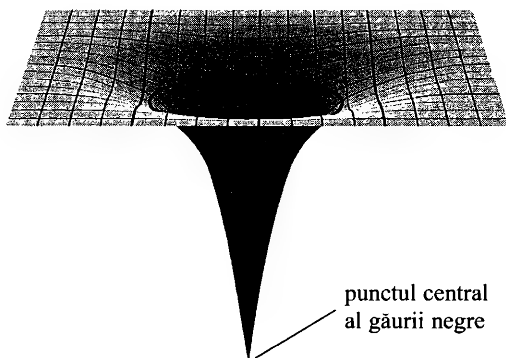


Figura 3.7 O gaură neagră deformează textura spaţio-temporală din jurul său atât de mult, încât nimic din ce depăşeşte „orizontul evenimentelor“ – reprezentat de cercul negru – nu mai poate scăpa câmpului ei gravitaţional. Nimeni nu ştie cu exactitate ce se întâmplă în punctul cel mai adânc al unei găuri negre.

condamnate: vor fi atrase inexorabil spre centrul găurii negre și supuse unei tensiuni gravitaționale tot mai mari și în final distrugătoare. De exemplu, dacă ai cădea cu picioarele înainte prin orizontul evenimentelor, pe măsură ce te apropii de centrul găurii negre, te-ai simți din ce în ce mai rău. Forța gravitațională a găurii negre va crește atât de spectaculos, încât atracția ei asupra picioarelor tale va fi mult mai mare decât cea asupra capului (deoarece într-o cădere cu picioarele înainte, picioarele sunt întotdeauna ceva mai aproape de centrul găurii negre decât capul); forța ar fi atât de mare, încât ți-ar rupe imediat corpul în fâșii.

Dacă, dimpotrivă, ai fi mai atent în „hoinăreala" ta în jurul găurilor negre și te-ai asigura că nu treci dincolo de orizontul evenimentelor, ai putea folosi gaura neagră pentru o acțiune incredibilă. Imaginează-ți, de exemplu, că ai descoperi o gaură neagră a cărei masă e cam de o mie de ori mai mare decât masa Soarelui și cobori pe un cablu, așa cum a făcut George când a coborât lângă Soare, până la aproximativ un centimetru deasupra orizontului evenimentelor găurii negre. Așa cum am arătat, câmpurile gravitaționale produc deformarea timpului, deci trecerea timpului va fi încetinită pentru tine. De fapt, cum găurile negre au un câmp gravitațional atât de puternic, trecerea timpului va fi *foarte lentă*. Ceasul tău va ticăi cam de zece mii de ori mai rar decât cele ale prietenilor de pe Pământ. Dacă ai pluti în acest mod chiar deasupra orizontului evenimentelor pentru un an de zile și apoi te-ai urca înapoi pe cablu spre nava spațială ca să te întorci acasă, ai descoperi că pe Pământ au trecut mai mult de zece mii de ani de când ai plecat. Vei fi folosit gaura neagră ca pe o mașină a timpului care îți permite să călătorești în viitorul îndepărtat al Pământului.

Ca să ne dăm seama de valorile mărimilor implicate, o stea cu masa Soarelui ar fi o gaură neagră dacă raza ei, în loc să aibă valoarea de acum (450 000 de mile), ar avea ceva mai puțin de 2 mile. Imaginați-vă: întregul Soarele înghesuit în partea de nord a Manhattanului. O linguriță din Soarele astfel comprimat ar cântări cât Muntele Everest. Ca să facem o gaură neagră din Pământ ar trebui să-l îndesăm într-o sferă a cărei rază e mai mică de un centimetru. Multă vreme fizicienii au fost sceptici în privința existenței unor astfel de configurații extreme ale materiei și mulți au crezut că găurile negre erau doar produsul imaginației unui teoretician suprasolicitat.

În ultimul deceniu însă s-au adunat o mulţime de dovezi experimentale convingătoare în favoarea existenţei găurilor negre. Evident, din moment ce sunt negre, ele nu pot fi observate direct prin scrutarea cerului cu telescopul. Astronomii caută găurile negre prin cercetarea anomaliilor de comportament ale unor stele obişnuite care emit lumină şi s-ar putea afla în apropierea orizontului evenimentelor unei găuri negre. De exemplu, când praful şi gazul din straturile exterioare ale stelelor obişnuite cad spre orizontului evenimentelor unei găuri negre, ele sunt accelerate până la o viteză foarte apropiată de viteza luminii. La asemenea viteze, frecarea din interiorul vârtejului de material în coborâre spre gaura neagră generează o cantitate enormă de căldură, făcând ca amestecul de praf cu gaz să „strălucească", emiţând lumină vizibilă şi raze X. Cum această radiaţie e produsă în imediata apropiere a orizontului evenimentelor, ea poate să scape de capcana găurii negre şi să-şi continue drumul prin spaţiu pentru a fi observată şi studiată în mod direct. Relativitatea generală face predicţii detaliate privind proprietăţile unor asemenea emisii de raze X; observarea acestor proprietăţi prezise oferă dovezi solide, chiar dacă indirecte, asupra existenţei găurilor negre. De exemplu, dovezi din ce în ce mai numeroase indică existenţa unei găuri negre foarte masive, cam de două milioane şi jumătate de ori mai masivă decât Soarele, aflată în centrul Căii Lactee – galaxia noastră. Dar chiar şi această gaură neagră de dimensiuni colosale păleşte în comparaţie cu ceea ce cred astronomii că ar exista în centrul cuasarilor extrem de luminoşi, împrăştiaţi prin cosmos: găuri negre ale căror mase ar putea fi de miliarde de ori mai mari decât masa Soarelui.

Schwarzschild a murit la numai câteva luni de la descoperirea soluţiei sale din cauza unei boli de piele contractată pe frontul rusesc. Avea 42 de ani. Scurta sa întâlnire cu teoria gravitaţiei a lui Einstein a dezvăluit una dintre cele mai uimitoare şi mai misterioase faţete ale naturii.

Al doilea exemplu care demonstrează puterea teoriei generale a relativităţii se referă la originea şi evoluţia întregului univers. După cum am văzut, Einstein a arătat că spaţiul şi timpul reacţionează la prezenţa masei şi energiei. Această deformare spaţio-temporală afectează mişcarea altor corpuri cosmice ce se deplasează în apropierea deformărilor rezultate. Pe de altă parte, modul exact în care aceste corpuri se mişcă, prin masele şi energiile lor, produce un efect suplimentar

de deformare a spațiului și timpului, care afectează la rândul lui mișcarea corpurilor, iar dansul înlănțuirilor cosmice continuă la nesfârșit. Prin ecuațiile relativității generale, ecuații ce-și au rădăcinile în caracteristicile geometrice ale spațiului curbat descrise în special de marele matematician al secolului XIX Georg Bernhard Riemann (despre Riemann vom vorbi mai târziu), Einstein a putut descrie cantitativ evoluția interconectată a spațiului, timpului și materiei. Spre surprinderea sa, când ecuațiile sunt aplicate în afara unor contexte izolate – cum ar fi cazul unei planete sau al unei comete ce se rotește în jurul unei stele – și se aplică întregului univers, se ajunge la o concluzie remarcabilă: *dimensiunea totală a universului spațial trebuie să se modifice în timp.* Altfel spus, textura universului fie se întinde, fie se contractă, dar nu este fixă. Ecuațiile relativității generale o demonstrează explicit.

Această concluzie a fost greu de acceptat chiar și pentru Einstein. El a răsturnat intuiția colectivă asupra naturii spațiului și timpului formată de mii de ani prin experiența de zi cu zi, dar ideea de univers etern și neschimbător era mult prea adânc înrădăcinată chiar și la acest gânditor radical pentru a fi abandonată. Din acest motiv, Einstein și-a revizuit ecuațiile și le-a modificat prin introducerea *constantei cosmologice*, un termen suplimentar care i-a permis să evite această perdicție și să se întoarcă la liniștea unui univers static. Doisprezece ani mai târziu însă, prin măsurători precise asupra galaxiilor îndepărtate, astronomul american Edwin Hubble a reușit să determine experimental faptul că universul se *dilată.* Într-o de acum faimoasă anecdotă din analele științei, Einstein s-a întors la forma inițială a ecuațiilor sale, calificând modificarea lor temporară drept cea mai mare gafă a vieții sale.[23] Deși la început el nu acceptase concluzia, teoria lui Einstein prezice totuși expansiunea universului. De fapt, în anii 1920, înainte de măsurătorile lui Hubble, meteorologul rus Aleksandr Friedmann a folosit ecuațiile inițiale ale lui Einstein pentru a arăta că galaxiile sunt transportate pe substratul texturii spațiale care se întinde, în felul acesta îndepărtându-se rapid unele de altele. Observațiile lui Hubble, precum și multe altele care au urmat, au confirmat pe deplin această concluzie uluitoare a relativității generale. Oferind explicația expansiunii universului, Einstein a săvârșit una dintre cele mai mari isprăvi intelectuale din toate timpurile.

Dacă textura spaţială se întinde, mărind astfel distanţa dintre galaxiile purtate de curgerea cosmică, putem să ne imaginăm că ne întoarcem în timp pentru a afla ceva despre originile universului. Inversând sensul timpului, textura spaţiului se va strânge, aducând galaxiile din ce în ce mai aproape una de alta. Asemeni conţinutului unei oale sub presiune, pe măsură ce universul care se strânge comprimă toate galaxiile una în alta, temperatura creşte mult, iar stelele se dezintegrează şi se formează o plasmă fierbinte de constituenţi elementari ai materiei. Dacă textura continuă să se strângă, temperatura creşte în continuare, la fel cum creşte şi densitatea plasmei primordiale. Dacă am da ceasul înapoi din prezent cu aproximativ 15 miliarde de ani, universul pe care îl cunoaştem ar avea o dimensiune infimă. Materia care alcătuieşte *absolut orice* – fiecare masină, casă, clădire, munte de pe Pământ; Pământul însuşi, Luna, Saturn, Jupiter şi orice altă planetă; Soarele şi orice altă stea a Căii Lactee; galaxia Andromeda cu cele 100 de miliarde de stele şi fiecare dintre cele peste 100 de miliarde de galaxii – toată materia e strânsă de menghina cosmică până la o densitate uluitoare. Şi, pe măsură ce ne întoarcem şi mai mult în timp, întregul cosmos e comprimat la dimensiunile unei portocale, ale unei lămâi, ale unui bob de mazăre, ale unui fir de nisip şi aşa mai departe, către dimensiuni din ce în ce mai mici. Extrapolând tot parcursul până la „începuturi", universul pare să fi început ca un *punct* – perspectivă pe care o vom examina critic în capitolele următoare – în care era concentrată toată materia şi energia la o temperatură şi densitate inimaginabile. Se crede că o explozie cosmică, big bang-ul, a izbucnit din acest amestec volatil, împrăştiind seminţele din care a evoluat universul pe care îl cunoaştem.

Imaginea big bang-ului ca explozie cosmică din care este expulzat conţinutul material al universului, asemeni schijelor unei bombe care explodează, e utilă, dar oarecum falsă. Explozia unei bombe se petrece într-un anume loc din *spaţiu* şi la un anumit moment de *timp*. Conţinutul ei este expulzat în spaţiul înconjurător. În cazul big bang-ului nu există spaţiu înconjurător. Când derulăm evoluţia universului în sens invers, spre începuturi, contractarea întregului conţinut material se produce prin restrângerea *întregului spaţiu*. Involuţia până la dimensiunea de portocală, de lămâie, de bob de mazăre, de fir de nisip se referă la *întregul* univers – nu la ceva din univers. Continuând în acest fel până la începutul începuturilor, pur şi simplu nu există nimic în

afara grenadei punctiforme primordiale. Big bang-ul este erupţia spaţiului comprimat a cărui expansiune, asemeni unui val uriaş, duce mai departe materia şi energia până în zilele noastre.

Este corectă relativitatea generală?

Nu s-a descoperit nici o abatere de la predicţiile relativităţii generale, în nici unul din experimentele efectuate la nivelul tehnologic actual. Doar timpul ne va spune dacă o precizie experimentală superioară poate dezvălui lacune, dovedind în felul acesta că şi această teorie e doar o descriere aproximativă a felului în care funcţionează natura. Testarea sistematică şi din ce în ce mai precisă a teoriilor este desigur una din căile prin care ştiinţa progresează, dar nu singura. De fapt, scenariul ne e cunoscut: căutarea unei noi teorii a gravitaţiei a fost iniţiată nu de o negare experimentală a teoriei lui Newton, ci de contradicţia dintre gravitaţia newtoniană şi o altă *teorie* – relativitatea specială. Abia după descoperirea teoriei generale a relativităţii ca teorie alternativă a gravitaţiei au fost identificate experimental neajunsuri ale teoriei lui Newton prin căutarea diferenţelor mici, dar măsurabile, dintre cele două teorii. Astfel, contradicţiile teoretice interne pot juca un rol la fel de important în orientarea progresului ca şi datele experimentale.

În ultima jumătate de secol, fizicienii au fost puşi în faţa unui alt conflict teoretic la fel de grav ca acela dintre relativitatea specială şi teoria lui Newton. Relativitatea generală pare fundamental incompatibilă cu o altă teorie testată cu mult succes: *mecanica cuantică*. Legat de conţinutul acestui capitol, contradicţia ne împiedică să înţelegem ce se întâmplă cu spaţiul, timpul şi materia când sunt complet comprimate în momentul big bang-ului sau în punctul central al unei găuri negre. Dacă adoptăm o perspectivă mai largă, putem spune că acest conflict ne previne asupra unei deficienţe fundamentale a concepţiei noastre despre natură. Nici cei mai mari fizicieni teoreticieni n-au izbutit să rezolve această contradicţie care, pe drept cuvânt, a fost numită *problema centrală* a fizicii teoretice moderne. Pentru a înţelege contradicţia trebuie să cunoaştem câteva trăsături fundamentale ale teoriei cuantice, spre care ne vom îndrepta acum atenţia.

CAPITOLUL 4
Ciudățenii microscopice

Ușor obosiți după expediția lor prin sistemul solar, George și Gracie se întorc pe Pământ și se îndreaptă spre H-Bar* pentru a se răcori după călătoria spațială. George comandă băuturile lor obișnuite – suc de papaia cu gheață pentru el și votca tonic pentru Gracie – și se trântește în scaun cu mâinile după ceafă pentru a-și savura trabucul abia aprins. Tocmai când se pregătește să tragă un fum constată uluit că trabucul i-a dispărut dintre dinți. Gândindu-se că trabucul trebuie să-i fi alunecat din gură, George se apleacă, așteptându-se să-l găsească arzându-i pantalonii sau cămașa. Dar nu este acolo. Trabucul nu e nicăieri. Trezită din contemplare de mișcările agitate ale lui George, Gracie privește peste umărul lui și observă trabucul așezat pe bar, exact *în spatele* scaunului lui George. „Ciudat," spune George, „cum să fi căzut tocmai acolo? E ca și cum ar fi trecut drept prin capul meu – dar limba mea nu e arsă și nici nu m-am ales cu vreo gaură". Gracie îl examinează pe George și confirmă că limba și capul lui par perfect normale. Băuturile sunt aduse, iar George și Gracie dau din umeri și consideră întâmplarea cu trabucul ca pe una dintre micile mistere ale vieții. Dar ciudățeniile din H-Bar continuă.

George se uită în paharul lui de suc și observă că cuburile de gheață zornaie încontinuu lovindu-se unul de altul și de pereții paharului ca niște mașinuțe care se ciocnesc în parcurile de distracții. Dar asta nu i se întâmplă numai lui. Gracie ridică paharul, care e cam de două ori mai mic decât cel al lui George, iar amândoi văd cum cuburile ei se ciocnesc și se agită și mai tare dacât ale lui George. Abia pot

* Joc de cuvinte: h bar (h barat) este constanta lui Planck și apare în toate ecuațiile mecanicii cuantice. (*N. red.*)

deosebi cuburile între ele, deoarece toate se estompează într-o masă de gheață. Dar asta nu e nimic pe lângă ce se întâmplă în continuare. Pe când George și Gracie privesc încremeniți băutura care se zgâlțâie, văd un cub de gheață trecând prin peretele paharului ei și căzând pe jos. Ei apucă paharul și văd că e intact; cubul de gheață a trecut prin sticla solidă fără să-i producă nici o stricăciune. „Astea sunt probabil halucinații provocate de plimbarea spațială", spune George. Se luptă amândoi cu frenezia cuburilor de gheață ca să dea băutura pe gât și să plece spre casă. În graba lor, George și Gracie nici nu-și dau seama că în loc de ușa adevărată au trecut printr-o ușă pictată pe perete. Dar patronii H-Barului sunt obișnuiți să vadă oameni trecând prin ziduri și nu se prea sinchisesc de plecarea precipitată a lui George și Gracie.

Cu un secol în urmă, în timp ce Conrad și Freud aduceau lumină în întunericul din inimile și sufletele oamenilor, fizicianul german Max Planck a aruncat prima rază de lumină asupra mecanicii cuantice, un cadru conceptual care susține, printre altele, că experiența lui George și Gracie de la H-Bar – redusă la dimensiuni microscopice – nu se datorează încețoșării minții. Asemenea evenimente neobișnuite și bizare sunt tipice pentru felul în care se comportă de fapt universul nostru la scări extrem de mici.

Cadrul cuantic

Mecanica cuantică este un cadru conceptual pentru înțelegerea proprietăților microscopice ale universului. La fel cum relativitatea specială și generală necesită schimbări drastice ale concepției noastre asupra lumii când obiectele se mișcă foarte rapid sau când sunt foarte masive, mecanica cuantică ne arată că universul are proprietăți cel puțin la fel de stranii când e examinat la scară atomică și subatomică. În 1965, Richard Feynmann, unul dintre cei mai mari specialiști în mecanică cuantică, scria:

> A fost o vreme când scria în ziare că doar doisprezece oameni înțelegeau teoria relativității. Nu cred să se fi întâmplat vreodată așa ceva. A existat un moment când numai un om a înțeles-o, pentru că el era singurul care și-a dat seama de ea, înainte de a-și scrie lucrarea. Dar, după ce oamenii au citit lucrarea, mulți au înțeles teoria relativității,

într-un fel sau altul, şi cu siguranţă erau mult mai mult de doisprezece oameni. Pe de altă parte, cred că pot spune cu certitudine că nimeni nu înțelege mecanica cuantică.[24]

Deşi Feynmann şi-a exprimat acest punct de vedere cu mai bine de trei decenii în urmă, el e valabil şi în ziua de azi. Ce a vrut el să spună este că, în ciuda faptului că teoriile specială şi generală ale relativităţii necesită o revizuire drastică a modului nostru obişnuit de a privi lumea, când se acceptă total principiile de bază pe care sunt construite, consecinţele noi şi neobişnuite privind spaţiul şi timpul decurg din raţionamente logice atente. Dacă vei cântări temeinic prezentarea ideilor lui Einstein din cele două capitole precedente, vei recunoaşte – chiar dacă numai pe moment – inevitabilitatea concluziilor trase de noi. Mecanica cuantică este diferită. Până prin 1928 majoritatea regulilor şi formulelor matematice ale mecanicii cuantice fuseseră stabilite şi de atunci au fost folosite cu mult succes pentru a face predicţiile numerice cele mai exacte din istoria ştiinţei. Dar, în fond, cei care folosesc mecanica cuantică urmează reguli și formule stabilite de „părinţii fondatori" ai teoriei – proceduri de calcul direct aplicabile – fără să înțeleagă cu adevărat *de ce* funcţionează aceste proceduri sau *ce* înseamnă ele cu adevărat. Spre deosebire de teoria relativității, cei care pot spune că înţeleg mecanica cuantică la un nivel intim sunt puţini, admiţând că există vreunul.

Ce să înțelegem din toate acestea? Înseamnă oare că la nivel microscopic universul funcţionează într-un mod atât de obscur şi neobişnuit, încât mintea umană, care a evoluat de-a lungul epocilor pentru a face faţă fenomenelor la scara vieţii cotidiene, este incapabilă să sesizeze „ce se petrece cu adevărat"? Sau poate că, printr-un accident istoric, fizicienii au construit o formulare extrem de alambicată a mecanicii cuantice care, deşi corectă din punct de vedere cantitativ, ascunde adevărata natură a realităţii? Nimeni nu ştie. Poate că în viitor un om inteligent va găsi o nouă formulare care va lămuri complet *ce*-urile și *de ce*-urile mecanicii cuantice. Sau poate că nu. Singurul lucru pe care îl ştim cu certitudine este că mecanica cuantică ne dovedeşte absolut şi irevocabil că o parte din conceptele de bază esenţiale înţelegerii lumii familiare de zi cu zi *îşi pierd orice înţeles* când atenţia noastră se restrânge la lumea microscopică. În consecinţă, trebuie să ne schimbăm semnificativ atât limbajul, cât şi modul de a gândi atunci

când încercăm să înțelegem și să explicăm universul la scară atomică și subatomică.

În secțiunile următoare vom prezenta elementele de bază ale acestui limbaj, precum și o parte din surprizele remarcabile pe care le aduce cu sine. Dacă până acum mecanica cuantică ți s-a părut cu totul bizară sau chiar absurdă, ar trebui să reții două lucruri. În primul rând, pe lângă faptul că este o teorie coerentă matematic, singurul motiv pentru care credem în mecanica cuantică este că ea furnizează predicții care au fost verificate cu o precizie uimitoare. Dacă cineva îți poate povesti o mulțime de detalii intime din propria ta copilărie, cu o dureroasă acuratețe, va fi greu să nu crezi că este chiar ruda ta demult pierdută. În al doilea rând, nu ești singurul care are asemenea reacții față de mecanica cuantică. În mai mare sau mai mică măsură, acest fel de a gândi a fost îmbrățișat de unii dintre cei mai iluștri fizicieni ai tuturor timpurilor. Einstein a refuzat cu totul să accepte mecanica cuantică. Chiar și Niels Bohr, unul dintre creatorii și susținătorii ei cei mai importanți, a remarcat o dată că dacă nu te ia uneori amețeala gândindu-te la mecanica cuantică, atunci n-ai înțeles-o cu adevărat.

E prea cald în bucătărie

Drumul către mecanica cuantică a început de la o problemă delicată. Imaginează-ți cuptorul de acasă perfect izolat, potrivit la o anumită temperatură, să zicem 400 de grade Fahrenheit, și lăsat suficient timp ca să se încălzească. Chiar dacă ai fi extras tot aerul din cuptor înainte de a-i da drumul, prin încălzirea pereților lui sunt generate unde de radiație în interior. Aceasta este același tip de radiație – căldură și lumină sub forma undelor electromagnetice – ca aceea emisă de suprafața Soarelui sau de un vătrai încălzit la roșu.

Iată problema. Undele electromagnetice transportă energie – viața pe Pământ, de exemplu, depinde crucial de energia transmisă de la Soare la Pământ prin intermediul undelor electromagnetice. La începutul secolului XX, fizicienii au calculat energia transportată de toată radiația electromagnetică din interiorul unui cuptor aflat la o temperatură dată. Folosind proceduri de calcul bine stabilite, ei au ajuns la

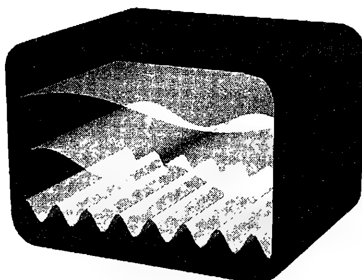


Figura 4.1 Teoria lui Maxwell ne spune că undele de radiație dintr-un cuptor au un număr întreg de vârfuri și văi – ele conțin un număr complet de cicluri de undă.

o concluzie absurdă: indiferent de temperatură aleasă, energia totală din cuptor este *infinită*.

Tuturor le-a fost clar că acest rezultat era ridicol – un cuptor încălzit poate acumula o mare cantitate de energie, dar în mod sigur nu o cantitate infinită. Pentru a înțelege soluția propusă de Planck, trebuie să privim problema mai îndeaproape. Se știe că atunci când se aplică teoria electromagnetică a lui Maxwell radiației dintr-un cuptor, undele generate de pereții încălziți trebuie să aibă un *număr* întreg de vârfuri și văi ce se potrivesc perfect între suprafețele opuse. Câteva exemple sunt prezentate în figura 4.1. Fizicienii folosesc trei termeni pentru a descrie aceste unde: lungime de undă, frecvență și amplitudine. *Lungimea de undă* este distanța dintre două vârfuri succesive sau două văi succesive ale undei, așa cum e ilustrat în figura 4.2. Mai multe vârfuri

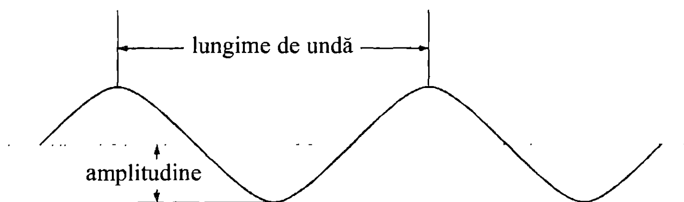


Figura 4.2 Lungimea de undă este distanța dintre două vârfuri sau văi succesive ale unei unde. Amplitudinea este înălțimea maximă sau adâncimea maximă a undei.

şi văi înseamnă o lungime de undă mai scurtă, deoarece toate trebuie să încapă între pereţii ficşi ai cuptorului. *Frecvenţa* se referă la numărul de cicluri de oscilaţie în sus şi în jos pe care unda le execută în fiecare secundă. Frecvenţa este determinată de lungimea de undă şi viceversa: lungimi de undă mai mari implică frecvenţe mai mici; lungimi de undă mai mici implică frecvenţe mai mari. Pentru a vedea de ce, să ne gândim la ce se întâmplă când produci o undă scuturând o frânghie lungă legată la un capăt. Pentru a genera o lungime de undă mai mare, mişti capătul liber al frângiei uşor în sus şi în jos. Frecvenţa undelor va fi egală cu numărul de cicluri pe secundă făcute de braţul tău şi este prin urmare destul de scăzută. Pentru a genera lungimi de undă scurte, scuturi capătul frânghiei mai frenetic – mai des –, iar asta generează o undă cu o frecvenţă mai mare. În sfârşit, fizicienii folosesc termenul de *amplitudine* pentru a specifica înălţimea sau adâncimea maximă a unei unde, cum e de asemenea ilustrat în figura 4.2.

Dacă undele electromagnetice ţi se par prea abstracte, există o altă analogie care te-ar putea ajuta: undele produse prin ciupirea unei corzi de vioară. Diferite frecvenţe ale undei corespund diferitelor note muzicale: cu cât frecvenţa e mai înaltă, cu atât nota e mai înaltă. Amplitudinea undei unei corzi de vioară este determinată de forţa cu care e ciupită. O ciupitură mai puternică înseamnă că imprimi mai multă energie undei, iar mai multă energie corespunde unei amplitudini mai mari. Poţi auzi aceasta prin volumul mai ridicat al sunetului. Invers, mai puţină energie corespunde unei amplitudini mai mici şi deci unui volum mai scăzut al sunetului.

Folosindu-se de termodinamica secolului XIX, fizicienii au putut determina ce cantitate de energie vor pompa pereţii încălziţi ai cuptorului în undele electromagnetice pentru fiecare lungime de undă permisă – vorbind la figurat, cât de tare vor „ciupi" pereţii fiecare undă. Rezultatul pe care l-au obţinut este simplu: fiecare dintre undele permise, *indiferent de lungimea ei de undă*, va transporta aceeaşi cantitate de energie (cantitate precis determinată de temperatura cuptorului). Cu alte cuvinte, toate modurile de undă posibile din cuptor sunt egale în ceea ce priveşte cantitatea de energie pe care o pot transporta.

La prima vedere, pare a fi un rezultat interesant, dar inofensiv. Ei bine, nu este aşa. El a dus la prăbuşirea a ceea ce avea să fie numit fizica clasică. Motivul e următorul: deşi condiţia ca toate undele să aibă un număr întreg de vârfuri şi văi înlătură o varietate enormă de

moduri de undă din cuptor, rămâne încă un număr infinit de moduri de undă posibile – acelea cu un număr din ce în ce mai mare de vârfuri şi văi. Cum fiecare tip de undă transportă aceeaşi cantitate de energie, un număr infinit de unde se traduce printr-o cantitate infinită de energie.

Porţiile începutului de secol

În 1900, Planck a avut o idee inspirată ce a oferit rezolvarea acestei dileme şi i-a adus premiul Nobel pentru fizică în 1918.[25] Spre a înţelege mai bine rezultatul lui Planck, imaginează-ţi că eşti înghesuit împreună cu o mulţime de oameni – „infinit" de mulţi – într-un depozit mare şi rece administrat de un proprietar hain. Pe perete se află un termostat digital modern ce controlează temperatura, dar eşti şocat când afli preţurile percepute de proprietar pentru încălzire. Dacă termostatul este reglat la 50 de grade Fahrenheit, toată lumea trebuie să plătească proprietarului 50 de dolari. Dacă termostatul este reglat la 55 de grade Fahrenheit, toată lumea trebuie să plătească 55 de dolari şi aşa mai departe. Îţi dai seama că, din moment ce împarţi depozitul cu un număr infinit de oameni, proprietarul va câştiga o sumă infinită dacă porneşti oricât de puţină căldură.

Dar, citind cu atenţie regulile de plată ale proprietarului, găseşti o soluţie. Din cauza faptului că proprietarul este un om foarte ocupat, el nu vrea să dea restul, mai ales că trebuie să facă asta individual, cu un număr infinit de chiriaşi. Aşa că el adoptă un sistem bazat pe încredere. Cei care pot plăti exact suma datorată o fac. Ceilalţi plătesc doar atât cât pot s-o facă fără a fi nevoie să ceară rest. Şi astfel, dorind să-i implici pe toţi, dar vrând să eviţi sumele exorbitante percepute pentru căldură, îţi convingi camarazii să organizeze averea grupului în următorul fel: o persoană are toate monedele de 1 cent, alta are toate monedele de 5 cenţi, alta are monedele de 10 cenţi, alta are monedele de 25 de cenţi, şi tot aşa sunt distribuite mai departe bancnotele de 1 dolar, de 5 dolari, de 10 dolari, de 20 de dolari, de 50 de dolari, de 100 de dolari, apoi bancnote din ce în ce mai mari, chiar dacă acestea nu ne sunt nouă familiare. Apoi reglaţi termostatul fără sfială la 80 de grade Fahrenheit şi aşteptaţi venirea proprietarului. Când acesta vine, persoana care deţine monedele de 1 cent se duce să plătească prima

şi îi predă 8 000 de monede. Următoarea persoană este cea care are monedele de 5 cenţi, care predă 1 600 de monede; cel care are monede de 10 cenţi îi dă 800 de monede, deţinătorul monedelor de 25 de cenţi îi dă 320, cel cu bancnote de 1 dolar predă 80, cel cu bancnote de 5 dolari îi dă 16, cel cu bancnote de 10 dolari îi dă 8, cel cu bancnote de 20 de dolari îi dă 4, cel cu bancnotele de 50 de dolari dă o singură bancnotă (deoarece două bancnote de 50 de dolari ar depăşi suma de plată şi ar necesita rest). Dar toţi ceilalţi deţin bancnote – deci cantitatea cea mai mică de bani pe care o pot plăti – a căror valoare depăşeşte suma de plată cerută de proprietar. De aceea nu-l pot plăti pe proprietar şi, prin urmare, în loc să primească suma infinită de bani la care se aştepta, proprietarul pleacă doar cu modesta sumă de 690 de dolari.

Planck s-a folosit de o strategie foarte asemănătoare pentru a schimba rezultatul absurd, conform căruia energia din orice cuptor este infinită, în rezultatul real, căruia îi corespunde o energie finită. Iată cum a procedat. Planck a făcut o propunere curajoasă: energia transportată de o undă electromagnetică în cuptor, ca şi banii, soseşte în porţii fixe. Energia poate fi egală cu valoarea unei astfel de porţii, poate avea de două ori valoarea ei sau de trei ori, de patru ori şi aşa mai departe – dar nu altă valoare. Este la fel cum nu poţi avea o treime de centimă sau două fise şi jumătate. Planck a afirmat că, în cazul energiei, fracţionarea nu e permisă. Pentru noi, unităţile monetare sunt determinate de Trezoreria Statului. Căutând o explicaţie mai profundă, Planck a sugerat că unitatea de energie a unei unde – porţia minimă de energie posibilă – este determinată de frecvenţa ei. Mai precis, el a susţinut că energia *minimă* pe care o poate avea o undă este *proporţională cu frecvenţa ei*: frecvenţă mai mare (lungime de undă mai mică) implică energie minimă mai mare; frecvenţă mai mică (lungime de undă mai mare) implică energie minimă mai mică. La fel cum valurile mici ale oceanului sunt mai lungi şi mai blânde, iar valurile puternice sunt scurte şi agitate, radiaţia cu lungime de undă mare conţine mai puţină energie decât cea cu lungime de undă mică.

Iată rezultatul final: calculele lui Planck au arătat că această porţionare a energiei permise a undelor corectează rezultatul absurd al energiei totale infinite. Nu e greu să vedem de ce. Când un cuptor e încălzit la temperatura aleasă, calculele bazate pe termodinamica secolului XIX prezic aceeaşi cantitate de energie cu care fiecare dintre unde ar fi trebuit să contribuie la energia totală. Dar asemeni acelor camarazi care nu pot contribui la suma comună datorată proprietarului pentru

că bancnota lor e prea mare, depășind suma cerută, dacă energia minimă pe care o poate transporta o anumită undă depășește energia cu care trebuie să contribuie, ea nu contribuie cu nimic și rămâne neactivată. Conform ipotezelor lui Planck, energia minimă pe care o poate transporta o undă este proporțională cu frecvența ei, undele din cuptor au frecvențe din ce în ce mai mari (lungimi de undă din ce în ce mai mici), iar la un moment dat această energie minimă va depăși energia cu care trebuie să contribuie fiecare undă. La fel ca oamenii din depozit care au bancnote mai mari de 50 de dolari, aceste unde cu frecvențe din ce în ce mai mari nu pot contribui la cantitatea de energie cerută de fizica secolului XIX. Și astfel, la fel cum doar un număr finit de oameni pot contribui la plata căldurii – având ca rezultat o sumă finită de bani – doar un număr finit de unde pot contribui la energia totală a cuptorului – conducând la o cantitate finită de energie totală. Fie că e vorba de energie sau de bani, împărțirea în unități fundamentale și creșterea continuă a acestor unități – creșterea cu frecvența a energiei undelor sau creșterea valorii bancnotelor – transformă rezultatul infinit într-unul finit.[26]

Prin eliminarea absurdității rezultatului infinit, Planck a făcut un pas important. Dar ce i-a convins pe oameni să creadă în adevărul spuselor sale a fost faptul că rezultatul finit obținut prin noua sa abordare a energiei unui cuptor era într-o concordanță perfectă cu măsurătorile experimentale. Mai precis, Planck a descoperit că prin ajustarea *unui parametru* care intra în noile sale calcule, el putea determina cu precizie energia măsurată a unui cuptor pentru orice temperatură aleasă. Acest unic parametru este factorul de proporționalitate dintre frecvența undei și cantitatea minimă de energie pe care unda o poate avea. Planck a descoperit că acest factor de proporționalitate – cunoscut acum sub numele de *constanta lui Planck* și notat ħ (se pronunța „h-bar") – este aproximativ o miliardime de miliardime de miliardime din unitățile curente.[27] Valoarea minusculă a constantei lui Planck arată că dimensiunea porțiilor de energie este în general foarte mică. De aceea ni se *pare* că, de exemplu, putem face ca energia undei unei corzi de vioară – deci și volumul sunetului pe care îl produce – să varieze în mod continuu. În realitate însă, energia undei variază în pași discreți*, à la Planck, dar dimensiunea pașilor este atât de mică, încât salturile

* În jargonul de specialitate, e vorba de caracteristica unei mărimi care nu poate lua decât anumite valori fixate, valorile intermediare fiindu-i interzise. (*N. red.*)

discrete de la un volum la altul dau senzaţia de continuitate. Conform presupunerilor lui Planck, dimensiunea acestor salturi de energie creşte odată cu frecvenţa undei (deci cu scăderea lungimii de undă). Acesta a fost ingredientul crucial care a rezolvat paradoxul energiei infinite.

Aşa cum vom vedea, ipoteza cuantică a lui Planck are consecinţe mult mai importante decât faptul că ne face să înţelegem conţinutul energetic al unui cuptor. Ea răstoarnă perspectiva noastră asupra lumii. Valoarea mică a lui ħ face ca abaterile radicale de la lumea cunoscută de noi să fie restrânse la domeniul microscopic, dar, dacă s-ar întâmpla ca ħ să fie mult mai mare, ciudăţeniile din H-Bar ar deveni realitatea de zi cu zi, aşa cum vom vedea că sunt fenomenele corespunzătoare lor din lumea microscopică.

Ce sunt porţiile?

Planck nu a dat nici o justificare pentru introducerea acestor porţii de energie. Dincolo de utilitatea lor, nici el, nici altcineva nu au putut găsi motivul existenţei lor. După cum a spus fizicianul George Gamow, era ca şi cum natura ţi-ar da voie să bei o halbă de bere întreagă sau nici una, dar nimic intermediar.[28] În 1905, Einstein a găsit o explicaţie, iar descoperirea i-a adus în 1921 premiul Nobel pentru fizică.

Einstein a găsit explicaţia în timp ce încerca să dezlege misterul efectului fotoelectric. În 1887, fizicianul german Heinrich Hertz a descoperit că, atunci când radiaţia electromagnetică – lumina – cade pe anumite metale, acestea emit electroni. În sine, descoperirea nu are nimic remarcabil. În metale, unii dintre electroni sunt slab legaţi de atomi (acesta este motivul pentru care metalele sunt atât de bune conducătoare de curent electric). Când lumina loveşte suprafaţa metalică, ea îşi eliberează energia, la fel cum face atunci când se loveşte de suprafaţa pielii tale, făcându-te să simţi căldură. Această energie transferată poate agita electronii din metal, iar unii dintre cei cu legături slabe pot fi aruncaţi afară.

Dar caracteristicile ciudate ale efectului fotoelectric devin evidente atunci când studiem proprietăţile electronilor expulzaţi. La prima vedere, aţi putea crede că pe măsură ce intensitatea luminii – strălucirea ei – creşte, viteza electronilor expulzaţi va creşte şi ea, din moment ce unda electromagnetică ce loveşte suprafaţa are mai multă energie.

Dar nu se întâmplă așa. De fapt, *numărul* electronilor expulzați crește, dar viteza lor rămâne aceeași. Pe de altă parte, s-a observat experimental că viteza electronilor expulzați *crește* dacă *frecvența* luminii care ciocnește suprafața crește și, reciproc, viteză lor scade dacă frecvența luminii scade. (Pentru undele electromagnetice din spectrul vizibil, o creștere a frecvenței corespunde unei schimbări de culoare de la roșu la portocaliu, galben, verde, albastru, indigo și, în final, violet. Frecvențele mai înalte decât cea a violetului nu mai sunt vizibile și corespund ultravioletului, iar apoi razelor X; frecvențe mai joase decât cele corespunzătoare roșului nu mai sunt nici ele vizibile și corespund radiației infraroșii.) Dacă scădem frecvența luminii folosite, la un moment dat viteza electronilor emiși scade la zero și ei nu mai sunt expulzați de pe suprafață, *indiferent de intensitatea, chiar și orbitoare, a sursei de lumină*. Dintr-un motiv necunoscut, *culoarea* razei de lumină incidente pe suprafața – și nu energia ei totală – hotărăște dacă electronii sunt emiși, iar în cazul afirmativ, stabilește energia pe care ei o vor avea.

Pentru a înțelege cum a explicat Einstein acest fenomen straniu, să ne întoarcem la depozit, care acum s-a încălzit la plăcuta temperatură de 80 de grade Fahrenheit. Să ne imaginăm că proprietarul, care urăște copiii, le cere tuturor celor sub 15 ani să locuiască în subsolul depozitului, iar adulții îi mai pot vedea numai dintr-un balcon construit de jur-împrejur. Mai mult, singura modalitate prin care oricare din nenumărații copii obligați să locuiască în subsol poate ieși la suprafață este să plătească gardianului 85 de cenți taxă de ieșire. (Proprietarul e într-adevăr un monstru!) Adulții, care la îndemnurile tale au împărțit averea colectivă pe unități valorice așa cu am arătat mai sus, pot da bani copiilor numai aruncându-le de la balcon. Să vedem ce se întâmplă.

Persoana care are monedele de 1 cent începe prin a arunca jos câteva, însă aceste monede sunt mult prea mici pentru ca vreunul dintre copii să-și poată plăti taxa de ieșire. Și fiindcă, teoretic, în pivniță este o mare „infinită" de copii, luptându-se feroce într-o învălmășeală îngrozitoare pentru a prinde banii care cad, chiar dacă adultul care deține monedele de 1 cent ar arunca enorme cantități, nici un copil nu va reuși să adune 85 de cenți pentru a-i plăti gardianului. Același lucru este valabil pentru adulții care dețin monedele de 5, 10 și 25 de cenți. Deși fiecare aruncă o sumă impresionantă de bani, copilul care reușește să obțină măcar o singură monedă este norocos (majoritatea

nu obţin nimic) şi în mod sigur nici unul dintre copii nu va reuşi să adune cei 85 de cenţi necesari plecării. Dar apoi, când adultul care are bancnotele de 1 dolar începe să arunce – chiar şi sume relativ mici, bancnotă după bancnotă –, copiii norocoşi care prind o singură bancnotă au posibilitatea să plece imediat. Să observăm totuşi că, pe măsură ce acest adult începe să arunce grămezi de bancnote de 1 dolar, numărul copiilor care au posibilitatea să plece creşte enorm, dar fiecăruia îi mai rămân exact 15 bani după ce plăteşte paznicului. Acest lucru rămâne adevărat indiferent de numărul total al bancnotelor de 1 dolar aruncate.

Despre asta e vorba în descrierea efectului fotoelectric. Bazându-se pe datele experimentale menţionate mai sus, Einstein a sugerat includerea ideii lui Planck privind porţiile de energie ale undei într-o nouă descriere a luminii. Conform lui Einstein, o rază de lumină ar trebui să fie asemănătoare unui *şuvoi de mici pachete* – particule, sau corpusculi mici de lumină – botezate în cele din urmă *fotoni* de chimistul Gilbert Lewis (o idee de care ne-am folosit în exemplul privind ceasul cu lumină din capitolul 2). Pentru a ne face o idee despre scara dimensiunilor implicate în această perspectivă corpusculară a luminii, un bec normal de 100 W emite aproximativ 100 de miliarde de miliarde (10^{20}) de fotoni pe secundă. Einstein a folosit această nouă abordare pentru a descrie mecanismul microscopic ce stă la baza efectului fotoelectric: el a spus că un electron este expulzat de pe suprafaţa metalului dacă este lovit de un foton care are suficientă energie. Dar ce determină energia unui foton individual? Pentru a explica datele experimentale, Einstein a mers pe urmele lui Planck şi a afirmat că energia *fiecărui* foton este proporţională cu frecvenţa undei de lumină (factorul de proporţionalitate fiind constanta lui Planck).

La fel ca taxa de ieşire pentru copii, electronii dintr-un metal trebuie să fie îmbrânciţi de un foton care trebuie să aibă o energie minimă pentru ca electronii să poată fi expulzaţi de pe suprafaţă. (La fel ca în cazul copiilor care se luptă pentru bani, există o probabilitate foarte scăzută ca un electron să fie lovit de mai mult de un singur foton – majoritatea nu sunt loviţi deloc.) Dar dacă frecvenţa razei de lumină care loveşte suprafaţa este prea joasă, fotonii ei, luaţi individual, vor fi lipsiţi de forţa necesară pentru a expulza electroni. La fel cum nici unul dintre copii nu va putea să plece, indiferent de cantitatea uriaşă de monede pe care adulţii o vor revărsa peste ei, nici electronii nu vor fi împinşi afară, indiferent de uriaşa energie totală încorporată în

fasciculul de lumină, dacă frecvenţa ei (deci energia fotonilor individuali) este prea joasă.

Pe de altă parte, aşa cum copiii pot părăsi depozitul imediat ce li se aruncă o unitate valorică suficient de mare, şi electronii vor fi expulzaţi de pe suprafaţă în momentul în care frecvenţa luminii îndreptate spre ei – deci valoarea energiei – este suficient de mare. Mai mult, la fel ca adultul care sporeşte suma totală de bani aruncaţi dând drumul la tot mai multe bancnote, intensitatea totală a fasciculului de lumină la o anumită frecvenţă este mărită prin creşterea numărului de fotoni pe care îi conţine. Şi, la fel cum mai multe bancnote de 1 dolar înseamnă mai mulţi copii care ies, mai mulţi fotoni înseamnă lovirea şi expulzarea mai multor electroni. Dar să nu uităm că energia rămasă acestor electroni după ce au fost eliberaţi de pe suprafaţă depinde numai de energia fotonului care i-a lovit – iar aceasta e determinată de frecvenţa fasciculului de lumină, şi nu de intensitatea lui totală. Aşa cum copiii care vor părăsi subsolul rămân cu câte 15 cenţi, indiferent de numărul de bancnote de 1 dolar aruncate, fiecare electron părăseşte suprafaţa cu aceeaşi energie – deci aceeaşi viteză – indiferent de intensitatea totală a fasciculul care ciocneşte suprafaţa metalului. O sumă totală mai mare înseamnă pur şi simplu că mai mulţi copii vor putea pleca; mai multă energie totală în fasciculul de lumină înseamnă pur şi simplu că mai mulţi electroni vor fi eliberaţi. Dacă vrem ca cei mici să părăsească subsolul cu mai mulţi bani, va trebui să creştem valoarea bancnotei aruncate jos; dacă dorim ca electronii să părăsească suprafaţa cu o viteză mai mare, va trebui să creştem frecvenţa fasciculului care ciocneşte suprafaţa metalului – adică trebuie să creştem valoarea energiei fotonilor trimişi pe suprafaţa metalului.

Acest rezultat este în deplină concordanţă cu datele experimentale. Frecvenţa luminii (culoarea ei) determină viteza electronilor expulzaţi; intensitatea totală a luminii determină numărul de electroni expulzaţi. Astfel, Einstein a arătat că ideea lui Planck privind porţiile indivizibile de energie reflectă de fapt o trăsătură fundamentală a undelor electromagnetice: ele se compun din particule – fotoni – care sunt nişte pachete mici, sau *cuante*, de lumină. Discontinuitatea energiei încorporate în asemenea unde se datorează faptului că ele sunt compuse din porţii.

Ideea lui Einstein a reprezentat un mare progres. Dar, aşa cum vom vedea, povestea nu e atât de simplă pe cât pare la prima vedere.

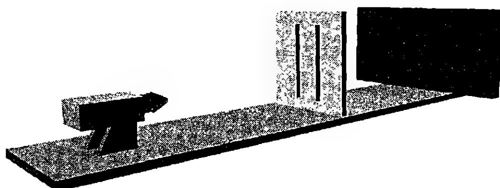


Fig. 4.3 În experimentul cu două fante, o rază de lumină este trimisă spre o barieră în care au fost tăiate două fante. Lumina care trece de barieră este înregistrată pe o placă fotografică, pentru cazurile când o fantă e deschisă sau ambele fante sunt deschise.

Undă sau particulă?

Toată lumea știe că apa – deci și valurile ei – e alcătuită dintr-un număr imens de molecule de apă. Este oare atât de surprinzător că undele de lumină sunt și ele alcătuite dintr-un număr mare de particule, și anume din fotoni? Da, este. Dar surpriza apare în detalii. Încă de acum trei sute de ani Newton a afirmat că lumina constă dintr-un șuvoi de particule, deci ideea nu era una nouă. Totuși, unii dintre colegii lui Newton, dintre care cel mai important a fost fizicianul olandez Christian Huygens, nu erau de acord cu el și susțineau că lumina ar fi o undă. Disputa a fost intensă, dar până la urmă experimentele efectuate de fizicianul englez Thomas Young, la începutul anilor 1800, au demonstrat că Newton se înșelase.

O versiune a experimentului lui Young – cunoscut sub numele de experimentul cu două fante – este ilustrată în figura 4.3. Lui Feynman îi plăcea să spună că toată mecanica cuantică ar putea fi rezumată

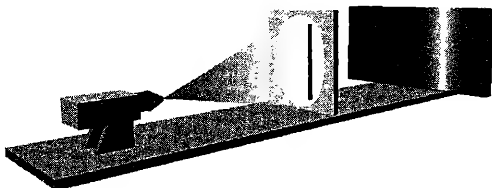


Figura 4.4. În acest experiment, fanta din dreapta este deschisă, iar pe placa fotografică apare imaginea din figură.

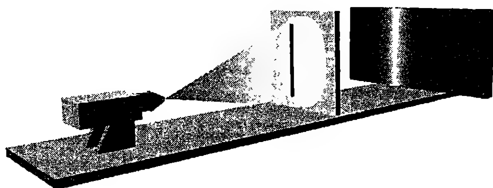


Figura 4.5. La fel ca în figura 4.4, numai că acum este deschisă fanta din stânga.

analizând atent implicaţiile acestui experiment, aşa că merită discutat. După cum se observă în figura 4.3, lumina este trimisă spre o suprafaţă subţire, solidă, în care sunt decupate două fante. O placă fotografică înregistrează lumina care trece prin fante – zonele mai luminoase din fotografie indică mai multă lumină incidentă. Experimentul constă în compararea imaginilor care se formează pe plăcile fotografice când fie e deschisă o fantă, fie ambele sunt deschise, iar sursa de lumină se aprinde.

Dacă fanta din stânga e acoperită şi cea din dreapta deschisă, fotografia arată ca în figura 4.4. Pare logic, din moment ce lumina trebuie să treacă prin unica fantă deschisă şi deci va fi concentrată în partea din dreapta a fotografiei. În mod similar, dacă fanta din dreapta e acoperită şi cea din stânga e deschisă, fotografia arată ca în figura 4.5. Dacă *ambele* fante sunt deschise, descrierea newtoniană a luminii conform căreia e alcătuită din particule prezice un rezultat asemănător celui din figura 4.6, adică o combinaţie a figurilor 4.4 şi 4.5. Dacă am considera corpusculii luminoşi ai lui Newton ca pe nişte alice cu care tragem în perete, cele care trec mai departe vor fi concentrate în cele două zone aliniate cu cele două fante. Dacă însă considerăm

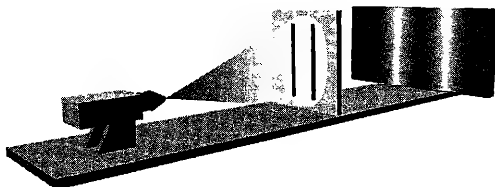


Figura 4.6. Teoria corpusculară a lui Newton prezice că, atunci când ambele fante sunt deschise, placa fotografică va fi o combinaţie a figurilor 4.4 şi 4.5.

lumina ca o undă, placa fotografică va înregistra un rezultat diferit în cazul când ambele fante sunt deschise. Să vedem ce se întâmplă.

Să ne imaginăm deocamdată că, în loc să avem de-a face cu unde de lumină, avem de-a face cu unde pe apă. Rezultatul va fi acelaşi, dar ne e mai uşor să ne imaginăm ce se întâmplă în cazul apei. Când undele de pe suprafaţa apei vor lovi bariera, din fiecare din cele două fante vor porni mai departe unde circulare, în genul celor create prin aruncarea unei pietricele într-un lac, aşa cum arată figura 4.7. (Acest experiment e simplu de realizat într-un lighean cu apă, folosind o barieră din carton în care aţi tăiat două fante.) Când undele ies din fiecare fantă, ele se suprapun şi se întâmplă ceva foarte interesant. Dacă două vârfuri de undă se suprapun, înălţimea undei de apă în acel punct creşte: ea va fi suma înălţimilor celor două vârfuri individuale. Dacă două văi ale undelor se suprapun, adâncimea undei în acel punct creşte în mod similar. Şi, în sfârşit, dacă un vârf al undei provenind de la o fantă se suprapune cu o vale a undei provenind de la cealaltă fantă, *ele se anulează reciproc.* (De fapt această idee stă la baza metodelor de eliminare a zgomotului în difuzoarele moderne – se măsoară forma undei sunetului care intră şi apoi se produce o a doua undă, a cărei formă este exact „opusul“ celei dintâi, având ca rezultat anularea zgomotului nedorit.) Între aceste suprapuneri extreme – vârfuri cu vârfuri, văi cu văi şi vârfuri cu văi – există o mulţime de amplificări şi atenuări parţiale. Dacă te-ai urca împreună cu un grup

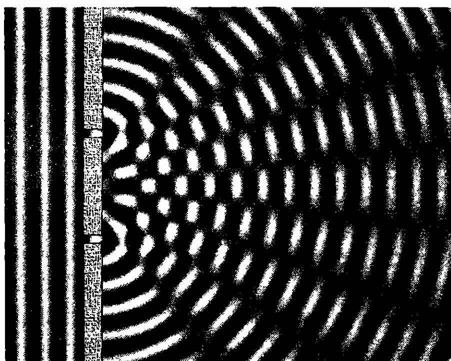


Figura 4.7. Undele circulare formate pe apă care ies din fiecare fantă se suprapun, făcând ca unda rezultată să fie amplificată în unele zone şi atenuată în altele.

de prieteni în bărcuţe şi aţi forma o linie de ambarcaţiuni paralelă cu bariera, iar fiecare ar spune cât de mult e ridicat şi coborât de valuri, rezultatul obţinut ar corespunde zonei din dreapta a figurii 4.7. Zonele unde balansul este mai mare sunt acelea unde vârfurile undelor (sau văile) ce provin de la fiecare fantă coincid. Regiunile de agitaţie minimă sau nulă corespund punctelor unde vârfurile undei de la una din fante se suprapun cu văile undei provenite de la cealaltă fantă, rezultând anularea lor.

Cum placa fotografică înregistrează cât de mult este „balansată“ de lumina incidentă, acelaşi raţionament aplicat fasciculului de lumină ne spune că atunci când ambele fante sunt deschise placa fotografică va arăta ca în figura 4.8. Zonele cele mai luminoase din figură sunt acelea pentru care vârfurile (sau văile) undelor de lumină ce vin de la fiecare fantă coincid. Zonele întunecate apar acolo unde vârfurile undei provenite de la o fantă se suprapun cu văile undei de la cealaltă fantă, având ca rezultat anularea lor. Acest şir de benzi luminoase şi întunecate e cunoscut sub numele de *franje de interferenţă*. Fotografiile din figurile 4.6 şi 4.8 diferă mult, deci se poate face un experiment concret pentru a stabili care din modelele corpuscular sau ondulatoriu al luminii este cel corect. Young a realizat o versiune a acestui experiment, iar rezultatele lui s-au potrivit cu cele din figura 4.8, confirmând în felul acesta modelul ondulatoriu. Modelul corpuscular al lui Newton a fost înlăturat (dar a trebuit să treacă o vreme până când fizicienii să accepte). Modelul ondulatoriu al luminii, declarat învingător, a fost apoi aşezat pe baze matematice solide de către Maxwell.

Dar Einstein, cel care a răsturnat teoria lui Newton despre gravitaţie, părea acum să fi readus la viaţă modelul corpuscular al luminii

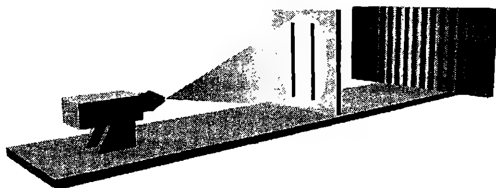


Figura 4.8. Dacă lumina este o undă, când ambele fante sunt deschise se va produce o interferenţă între porţiunile de unde care ies din fiecare fantă.

prin introducerea fotonilor. Bineînţeles că ne confruntăm cu aceeaşi întrebare: cum se poate ca un model corpuscular să explice formarea franjelor de interferenţă ca acelea din figura 4.8? Ca primă încercare, ai putea face următoarea propunere. Apa e compusă din molecule H_2O – „particulele“ apei. Dar, când o mulţime de asemenea molecule curg împreună, ele pot produce unde de apă, cu proprietăţile de interferenţă aşteptate, conform figurii 4.7. Aşa că ar fi rezonabil să spunem că proprietăţile ondulatorii, cum ar fi franjele de interferenţă, pot apărea şi în modelul corpuscular, cu condiţia să fie implicat un număr impresionant de particule de lumină – adică fotoni.

În realitate însă, lumea microscopică este mult mai subtilă. Chiar dacă intensitatea sursei de lumină din figura 4.8 este redusă din ce în ce mai mult, până la o valoare la care fotonii sunt emişi *unul câte unul* spre barieră – de pildă cu o rată de unul la 10 secunde –, imaginea care va rezulta pe placa fotografică va arăta *tot* ca aceea din figura 4.8. Dacă aşteptăm suficient de mult ca un număr colosal de asemenea pachete de lumină separate să pătrundă prin fante şi fiecare să fie înregistrat printr-un punct acolo unde loveşte placa fotografică, până la urmă aceste puncte vor construi imaginea unor franje de interferenţă, ca în figura 4.8. E uimitor. Cum pot particule *individuale* ca fotonii care trec pe rând prin paravan şi lovesc separat placa fotografică să conspire la realizarea benzilor luminoase şi întunecate asemeni celor ale undelor care interferă? Un raţionament convenţional ne arată că fiecare dintre fotoni va trece ori prin fanta din dreapta, ori prin cea din stânga, aşa că la sfârşit ne aşteptăm să observăm pe placa fotografică o imagine asemănătoare celei din figura 4.6. Dar nu se întâmplă aşa.

Dacă nu eşti fascinat de acest fenomen al naturii, înseamnă că ori l-ai mai văzut şi ai devenit blazat, ori prezentarea de până acum nu a fost suficient de vie. Presupunând că a doua variantă e cea corectă, să mai prezentăm o dată fenomenul, dar într-un mod puţin diferit. Închidem fanta din stânga şi trimitem, unul câte unul, fotonii spre paravan. Unii trec prin fantă, alţii nu. Cei care trec creează punct cu punct pe placa fotografică o imagine ca aceea din figura 4.4. Apoi efectuezi din nou experimentul folosind o nouă placă fotografică, de data asta deschizând ambele fante. Evident, te vei gândi că acest lucru va creşte numărul de fotoni ce trec prin fantele ecranului şi lovesc placa fotografică, expunând în felul acesta filmul la o cantitate mai mare de lumină

decât în cazul primului experiment. Dar când vei examina fotografia rezultată, vei observa nu numai că zone care rămăseseră întunecate în primul experiment sunt acum luminoase, după cum te așteptai de altfel, dar și că zone care erau luminoase în primul experiment acum sunt întunecate, ca în figura 4.8. Prin *creșterea* numărului de fotoni ce lovesc placa fotografică, luminozitatea în unele zone a *scăzut*. Într-un fel sau altul, fotonii separați temporal se pot anula reciproc. E foarte ciudat: fotonii care ar fi trecut prin fanta dreaptă și ar fi lovit placa fotografică în zona unde acum e o bandă întunecată (vezi figura 4.8) nu mai pot face acest lucru când se deschide și fanta din stânga (acesta este motivul pentru care acum banda e întunecată). Dar cum e posibil ca un pachet mic de lumină care trece printr-una din fante să fie afectat în vreun fel de faptul că *cealaltă* fantă este deschisă sau nu? După cum spunea Feynman, e la fel de ciudat ca și cum ai trage cu pușca spre paravan și, atunci când ambele fante sunt deschise, gloanțele trase independent și separat unul de altul s-ar anula reciproc, lăsând zone intacte pe țintă – zone care de altfel *sunt lovite* când numai una din fantele ecranului este deschisă.

Asemenea experimente arată că particulele de lumină ale lui Einstein sunt foarte diferite de cele ale lui Newton. Într-un fel, fotonii, deși sunt particule, prezintă și trăsăturile undei de lumină. Faptul că energia acestor particule e determinată de o caracteristică specifică undei – frecvența – este primul indiciu că se produce o combinație ciudată. Dar efectul fotoelectric și experimentul cu două fante ne fac să înțelegem despre ce este vorba. Efectul fotoelectric ne arată că lumina are proprietăți de particulă. Experimentul cu fante ne arată că lumina manifestă proprietățile de interferență ale undelor. Împreună, cele două experimente ne arată că lumina are *și proprietăți de undă, și proprietăți de particulă*. Când este vorba de lumea microscopică trebuie să lăsăm la o parte prejudecata că ceva este fie undă, fie particulă și să acceptăm că *ambele* posibilități sunt valabile în același timp. Aici se cere citată afirmația lui Feynman că „nimeni nu înțelege mecanica cuantică“. Putem pronunța cuvinte precum „dualismul undă-particulă“. Putem traduce aceste cuvinte într-un formalism matematic ce descrie experimentele din lumea reală cu o incredibilă precizie. Dar este extrem de dificil să înțelegem această caracteristică uimitoare a lumii microscopice la un nivel profund, intuitiv.

Particulele de materie sunt şi unde

În primele decenii ale secolului XX mulţi dintre cei mai mari fizicieni teoreticieni s-au apucat cu entuziasm să construiască un model solid din punct de vedere matematic şi plauzibil din punct de vedere fizic care să explice aceste trăsături ciudate ale lumii microscopice. La Copenhaga, sub îndrumarea lui Niels Bohr, s-a făcut de exemplu un progres important în explicarea proprietăţilor luminii emise de atomii de hidrogen. Dar era vorba, ca şi în cazul altor studii efectuate înainte de mijlocul anilor 1920, mai curând de unirea artificială a ideilor secolului XIX cu noile concepte ale mecanicii cuantice, decât de un cadru coerent pentru înţelegerea universului fizic. În comparaţie cu logica şi claritatea legilor de mişcare ale lui Newton sau ale teoriei electromagnetice a lui Maxwell, teoria cuantică parţial dezvoltată era într-o stare de haos.

În 1923, tânărul prinţ francez Louis de Broglie a adăugat un nou element amalgamului cuantic, element care va contribui la apariţia cadrului matematic al mecanicii cuantice moderne şi care i-a adus în 1929 premiul Nobel pentru fizică. Inspirat de o serie de raţionamente bazate pe teoria relativităţii speciale a lui Einstein, de Broglie a afirmat că dualismul undă-particulă se aplică nu numai luminii, dar şi materiei. El a pornit de la faptul că relaţia lui Einstein $E=mc^2$ leagă masa de energie, iar Planck şi Einstein legaseră noţiunea de energie de cea de frecvenţă a undelor; prin urmare, masa ar trebui să aibă şi ea caracter ondulatoriu. Urmând această idee, el a sugerat că, aşa cum lumina este un fenomen ondulatoriu despre care mecanica cuantică a arătat că admite o la fel de îndreptăţită tratare corpusculară, un electron – la care ne gândim în mod normal ca la o particulă – ar putea fi descris cu aceeaşi îndreptăţire şi în termeni de undă. Einstein a adoptat imediat ideea lui de Broglie, fiind o prelungire firească a propriilor sale contribuţii legate de relativitate şi de fotoni. Nimic însă nu poate înlocui dovezile experimentale. Confirmarea a venit curând din partea lui Clinton Davisson şi Lester Germer.

Pe la mijlocul anilor 1920, Davisson şi Germer, fizicieni experimentatori la compania de telefonie Bell, studiau modul în care un fascicul de electroni se reflectă pe o bucată de nichel. Singurul detaliu important pentru noi este acela că, într-un astfel de experiment,

cristalele de nichel se comportă asemănător celor două fante din experimentul prezentat în secţiunea anterioară – putem considera fara rezerve acest experiment aidoma celui anterior, cu excepţia faptului că în locul unui fascicul de lumină avem un fascicul de electroni. Vom adopta deci acest punct de vedere. Când Davisson şi Germer au examinat electronii care pătrundeau prin cele două fante ale paravanului şi loveau un ecran fosforescent ce înregistra locul de impact al fiecărui electron printr-un punct strălucitor – fenomenul seamănă cu cel care are loc într-un televizor – au descoperit ceva absolut remarcabil. Pe ecran s-a format un model foarte asemănător cu cel din figura 4.8. Experimentul lor a arătat deci că electronii manifestă fenomene de interferenţă, semn evident al *undelor*. În zonele întunecate de pe ecranul fosforescent, electronii „se anulau cumva unii pe alţii“, la fel ca vârfurile şi văile care se suprapuneau în undele de pe apă. Chiar dacă fasciculul de electroni era atât de „subţiat“, încât, de exemplu, numai un electron era emis la fiecare 10 secunde, electronii individuali tot formau pe ecran benzile luminoase şi întunecate – punct cu punct. Cumva, ca şi fotonii, electronii independenţi „interferă“ cu ei înşişi astfel încât electronii individuali, în cursul timpului, reconstruiesc benzile de interferenţă asociate undelor. Suntem obligaţi să tragem concluzia că fiecare electron prezintă şi caracteristici de undă în plus faţă de cele de particulă, mai familiare nouă.

Deşi am prezentat aici cazul electronilor, experimente similare ne duc la concluzia că *toată* materia are caracteristici de undă. Dar cum se împacă toate acestea cu experienţa noastră cotidiană, în care materia este solidă şi rigidă, nicidecum asemeni unei unde? Ei bine, de Broglie a stabilit formula de calculul a lungimii de undă pentru undele de materie, care arată că lungimea de undă este proporţională cu constanta lui Planck, $\hbar$. (Mai precis, lungimea de undă este dată de $\hbar$ împărţit la impulsul corpului material.) Cum $\hbar$ este foarte mic, şi lungimile de undă rezultate sunt minuscule în comparaţie cu scara de dimensiuni cotidiană. Aşa se explică de ce caracterul ondulatoriu al materiei devine vizibil doar la o examinare microscopică atentă. La fel cum valoarea mare a lui c, viteza luminii, ascunde în mare parte adevărata natură a spaţiului şi a timpului, valoarea mică a lui $\hbar$ ascunde aspectul ondulatoriu al materiei în viaţa de zi cu zi.

Ce fel de unde?

Fenomenul de interferență descoperit de Davisson și Germer a făcut ca proprietățile de undă ale electronului să devină evidente. Dar *ce* fel de unde? Fizicianul austriac Erwin Schrödinger a sugerat că undele sunt de fapt electroni „extinși." Această idee dă oarecare sens undei electronului, dar era prea vagă. Dacă întinzi ceva, o parte din acel ceva e aici, altă parte e dincolo. Nimeni nu a întâlnit însă o jumătate de electron, o treime de electron sau vreo altă fracțiune a lui. Aceasta face greu de înțeles ce înseamnă un electron extins. Ca o alternativă, în 1926, fizicianul german Max Born a prelucrat interpretarea lui Schrödinger, iar această nouă interpretare – dezvoltată de Bohr și colegii săi – este cea pe care o folosim și noi astăzi. Propunerea lui Born scoate la iveală una dintre cele mai ciudate caracteristici ale teoriei cuantice, dar ea este indubitabil confirmată de o mulțime de experimente. El a afirmat că unda electronului trebuie interpretată din punct de vedere *probabilistic*. Locurile în care înălțimea (ca să fim mai corecți, pătratul înălțimii) undei este *mare* sunt locurile unde probabilitatea de a găsi electronul e mai mare; zonele în care înălțimea undei este *mică* sunt zonele unde probabilitatea de a găsi electronul este mai mică. Figura 4.9 ilustrează un exemplu în acest sens.

Aceasta este o idee cu adevărat ciudată. Ce amestec poate să aibă probabilitatea în formularea fundamentelor fizicii? Suntem obișnuiți cu probabilități în cursele de cai, în aruncarea banului sau la ruletă,

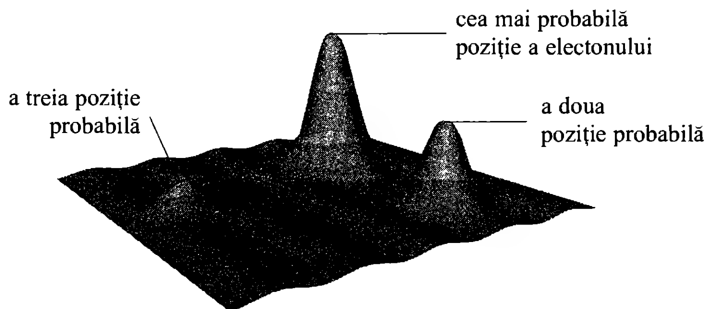


Figura 4.9 Unda asociată unui electron este mai înaltă acolo unde electronul are probabilitate mai mare de a fi găsit și este din ce în ce mai mică în zonele unde probabilitatea de a găsi electronul scade.

dar în aceste exemple ele reflectă doar cunoașterea noastră *incompletă*. Dacă am cunoaște *precis* viteza roții ruletei, greutatea și duritatea bilei, locul și viteza cu care cade pe roată, specificațiile exacte ale materialelor din care sunt construite locașurile și așa mai departe, și dacă am folosi calculatoare suficient de puternice pentru a efectua calculele necesare, conform fizicii clasice am putea prezice cu certitudine locul unde se va opri bila. Cazinourile se bazează pe incapacitatea noastră de a aduna toate aceste informații și de a efectua calculele necesare înainte de a paria. Dar vedem că probabilitatea despre care e vorba în jocurile de ruletă nu reflectă nimic fundamental din felul în care funcționează lumea. Mecanica cuantică însă inserează conceptul de probabilitate în univers la un nivel mult mai profund. În conformitate cu interpretarea dată de Born, validată de experimente efectuate în cursul a mai bine de jumătate de secol, natura ondulatorie a materiei implică faptul că materia însăși trebuie descrisă la nivel fundamental într-o manieră probabilistică. Regula formulată de de Broglie ne arată că pentru obiecte macroscopice, cum ar fi ruleta sau ceașca de cafea, caracterul ondulatoriu este practic neobservabil, așa că în situații obișnuite probabilitatea asociată mecanicii cuantice poate fi ignorată. La nivel microscopic însă, tot ce putem spune este că, pentru orice poziție dată, există o anumită probabilitate ca electronul să se găsească acolo.

Interpretarea probabilistică prezintă următorul avantaj: dacă unda electronului se comportă ca orice altă undă – de exemplu, atunci când se lovește de un obstacol se împrăștie formând tot felul de valuri distincte – asta nu înseamnă că electronul însuși se desface în fragmente separate, ci doar că putem găsi electronul în diverse locuri, cu anumite probabilități. În practică, asta înseamnă că, dacă repetăm identic de mai multe ori un experiment în care este implicat un electron, electronul nu se va găsi în aceeași poziție de fiecare dată. Dimpotrivă, repetând experimentul, vom găsi electronul într-o mulțime de poziții diferite, dar distribuite astfel încât numărul de experimente în care găsim electronul într-o anumită zonă este determinat de înălțimea undei de probabilitate în acea zonă. Dacă unda de probabilitate (mai precis pătratul ei) este de două ori mai înaltă în punctul A decât în punctul B, atunci teoria ne spune că, într-un șir lung de repetări ale experimentului, electronul va fi găsit în punctul A de două ori mai des decât în punctul B. Rezultatele exacte ale experimentelor nu pot

fi prezise; tot ce putem face este să prezicem probabilitatea cu care un anumit rezultat *poate* fi obţinut.

Chiar şi aşa, atât timp cât putem determina matematic forma exactă a undelor de probabilitate, predicţiile probabiliste *pot* fi testate prin repetarea unui anumit experiment de multe ori, măsurând în felul acesta posibilitatea obţinerii unui rezultat sau altuia. La numai câteva luni după propunerea lui de Broglie, Schrödinger a făcut pasul decisiv în această direcţie, găsind ecuaţia care guvernează forma şi evoluţia în timp a undelor de probabilitate sau, aşa cum sunt numite acum, a *funcţiilor de undă*. Nu a durat mult până când ecuaţia lui Schrödinger şi interpretarea probabilistă au fost folosite pentru predicţii extrem de precise. În 1927, inocenţa clasică era deja pierdută. Trecuseră zilele în care universul era privit ca un mecanism ale cărui componente individuale au fost puse în mişcare la un moment din trecut şi care îşi urmau cu obedienţă destinul unic şi inexorabil. Conform mecanicii cuantice, universul evoluează supunându-se unui formalism matematic riguros, dar acest cadru determină doar probabilitatea de a avea un anumit viitor, nu şi care anume va fi acel viitor.

Mulţi consideră această concluzie tulburătoare, ba chiar inacceptabilă. Einstein a fost unul dintre aceştia. Într-una din cele mai cunoscute fraze din istoria fizicii, Einstein îi avertiza pe partizanii mecanicii cuantice că „Dumnezeu nu joacă zaruri cu universul". El simţea că probabilitatea a apărut în fizica fundamentală dintr-un motiv subtil, dar asemănător cu cel din cazul ruletei: anumite neajunsuri esenţiale în înţelegerea noastră. Din perspectiva lui Einstein, universul nu putea avea un viitor a cărui formă precisă depindea de şansă. Fizica ar trebui să prezică *cum* va evolua universul, nu doar probabilitatea unei anumite evoluţii. Dar experiment după experiment – unele dintre cele mai convingătoare fiind efectuate după moartea sa – au arătat că Einstein greşea. Fizicianul teoretician englez Stephen Hawking spunea în acest sens că „Einstein s-a înşelat, nu teoria cuantică".[29]

Şi totuşi, disputa privind sensul real al mecanicii cuantice continuă. Toată lumea e de acord în privinţa felului în care trebuie folosite ecuaţiile teoriei cuantice pentru a face predicţii exacte. Dar nu există consens atunci când e vorba despre sensul real al undelor de probabilitate sau despre modul cum îşi „alege" o particulă unul din numeroasele viitoruri posibile; nici măcar nu putem spune dacă particula îşi alege într-adevăr viitorul sau se despică pentru a trăi ramificat toate

viitorurile posibile într-o arenă de universuri paralele aflată în continuă expansiune. Discutarea acestor interpretări poate face obiectul unui întreg volum şi există deja multe cărţi excelente care prezintă diferite perspective asupra teoriei cuantice. Un lucru însă e cert: indiferent cum interpretezi mecanica cuantică, ea ne arată indubitabil că universul se bazează pe principii care, din punctul de vedere al experienţelor noastre cotidiene, sunt stranii.

Morala care se poate extrage atât din teoria relativităţii, cât și din mecanica cuantică este că atunci când sondăm în profunzime funcţionarea universului putem descoperi aspecte total diferite de cele la care ne aşteptăm. Curajul de a pune întrebări profunde trebuie dublat de o flexibilitate nebănuită dacă ajungem să acceptăm răspunsurile.

Perspectiva lui Feynman

Richard Feynman a fost unul din cei mai mari fizicieni teoreticieni de la Einstein încoace. El a acceptat total esenţa probabilistică a mecanicii cuantice, dar în anii care au urmat celui de-al Doilea Război Mondial a oferit un nou mod de a concepe această teorie. În privinţa predicţiilor numerice, perspectiva lui Feynman *concordă pe deplin* cu tot ce am spus până acum. Dar formularea este total diferită. O vom prezenta în contextul experimentului cu electronul şi paravanul cu două fante.

Ceea ce ne tulbură la figura 4.8 este faptul că noi ne imaginăm fiecare electron trecând fie prin fanta din stânga, fie prin fanta din dreapta, deci ne aşteptăm să vedem în final o imagine asemănătoare celei din figura 4.6, adică o combinaţie a figurilor 4.4 şi 4.5 care să reprezinte cu precizie datele rezultate. Pentru un electron care trece prin fanta din dreapta nu ar trebui să conteze faptul că există și fanta din stânga, şi viceversa. Şi totuşi contează. Franjele de interferenţă generate necesită o suprapunere şi o întrepătrundere a *ceva* sensibil la ambele fante, chiar şi în cazul când trimitem electronii unul câte unul. Schrödinger, de Broglie şi Born au explicat acest fenomen prin asocierea unei unde de probabilitate fiecărui electron. Asemeni undelor apei din figura 4.7, unda de probabilitate a electronului „vede" ambele fante şi este supusă aceluiaşi fenomen de interferenţă prin combinare.

Zonele în care unda de probabilitate crește din cauza acestei combinări, ca și zonele de balans mare din figura 4.7, sunt locurile unde există o probabilitate mare de a găsi electronul. Zonele în care combinarea duce la o scădere a undei de probabilitate, ca și zonele de balans mic sau lipsit de balans din figura 4.7, sunt cele în care electronul are o probabilitate mai mică sau chiar nulă de a fi găsit. Electronii lovesc ecranul fosforescent unul câte unul, distribuiți conform acestui profil de probabilitate, și deci formează franje de interferență asemănătoare celor din figura 4.8.

Feynman a avut o abordare diferită. El a contestat presupunerea clasică conform căreia fiecare din electroni trece ori prin fanta din stânga, ori prin cea din dreapta. Te-ai putea gândi că e absurd să te îndoiești de o proprietate atât de evidentă. La urma urmei, nu poți oare *privi* regiunea dintre fante și ecranul fosforescent ca să vezi prin care dintre cele două fante trece electronul? Poți. Dar asta înseamnă să *modifici* experimentul. Pentru a *vedea* electronul, trebuie să-i *faci* ceva – de exemplu, îl poți lumina, adică poți trimite fotoni care să se lovească de el. La scara cotidiană, fotonii sunt ca niște sonde neglijabil de mici care se lovesc de copaci, de tablouri și de oameni, neavând nici un efect semnificativ asupra stării de mișcare a acestor corpuri materiale mari. Dar electronii sunt mici fărâme de materie. Indiferent cu câtă delicatețe încerci să determini fanta prin care au trecut, fotonii care vor lovi electronii vor afecta în mod obligatoriu mișcarea acestora. Iar schimbarea mișcării schimbă și rezultatele experimentului. Dacă modifici experimentul exact atât cât e necesar pentru a determina fanta prin care trece fiecare electron, experiența arată că rezulatele se vor modifica față de cele din figura 4.8, devenind cele din figura 4.6! Lumea cuantică face ca, odată ce a fost stabilită fanta prin care trece fiecare electron, interferența dintre cele două fante să dispară.

Astfel, contestarea lui Feynman devine justificată, din moment ce – deși experiența noastră cotidiană pare să impună ca un electron să treacă printr-una din fante sau prin cealaltă – pe la sfârșitul anilor 1920, fizicienii au înțeles că orice încercare de a verifica această ipoteză banală și fundamentală distruge experimentul.

Feynman a susținut că fiecare electron care ajunge la ecranul fosforescent trece de fapt prin *ambele* fante. Pare o nebunie, dar, atenție, lucrurile o iau razna și mai tare! Feynman a afirmat că electronul care

pornește de la sursă și ajunge la un anumit punct de pe ecranul fosforescent parcurge de fapt *toate traiectoriile posibile în același timp*; câteva din aceste traiectorii sunt ilustrate în figura 4.10. Electronul urmează o cale directă și trece prin fanta din stânga. Simultan însă, el urmează și calea directă care-l face să treacă prin fanta din dreapta. Pe de altă parte, se îndreaptă spre fanta din stânga, dar deodată își schimbă traiectoria și trece prin cea din dreapta. Are un drum sinuos, înainte și înapoi, trecând, în final, prin fanta din stânga. Face o călătorie lungă în galaxia Andromeda, după care se întoarce pentru a trece din nou prin fanta din stânga în drumul său spre ecran. Și tot așa, conform perspectivei lui Feynman, electronul „adulmecă" simultan *toate* traiectoriile posibile între poziția lui inițială și cea finală.

Feynman a arătat că poate atribui un număr fiecăreia dintre aceste traiectorii, așa încât media lor combinată să dea exact același rezultat cu probabilitatea calculată prin metoda funcției de undă. Astfel, din perspectiva lui Feynman, nu e nevoie să asociem electronului nici o undă de probabilitate. În schimb, va trebui să ne imaginăm ceva cel puțin la fel de ciudat. Probabilitatea ca un electron – privit mereu ca o particulă – să ajungă într-un anume punct de pe ecran se construiește din efectul combinat al tuturor căilor posibile de a ajunge în acel punct. Această metodă poartă numele de abordarea mecanicii cuantice conform „sumei după traiectorii" a lui Feynman.[30]

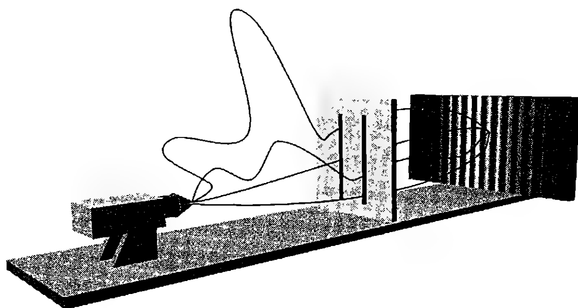


Figura 4.10 În conformitate cu formularea mecanicii cuantice dată de Feynman, particulele se deplasează de la o poziție la alta de-a lungul oricărui drum posibil. Aici sunt reprezentate câteva din infinitatea de drumuri ale unui electron, în călătoria sa de la sursă la ecranul fosforescent. Observați că acest electron trece de fapt prin ambele fante.

În acest moment, educaţia voastră clasică se va împotrivi: cum să fie posibil ca un electron s-o ia *simultan* pe căi diferite – mai ales că există un număr infinit de asemenea căi? Pare o obiecţie întemeiată, dar mecanica cuantică – fizica lumii noastre reale – îţi cere să renunţi la asemenea obiecţii de „bun-simţ". Rezultatele calculelor prin metoda lui Feynman sunt în concordanţă cu cele ale metodei funcţiei de undă, care, la rândul lor, sunt în concordanţă cu experimentul. Trebuie să lăsăm natura să decidă ce este şi ce nu este rezonabil. După cum scria Feynman, „[mecanica cuantică] dă naturii o descriere absurdă din perspectiva bunului-simţ. Şi este în perfectă concordanţă cu experimentul. Sper deci să puteţi accepta natura aşa cum e Ea – absurdă".[31] Dar indiferent cât de absurdă pare natura când o examinăm la scară microscopică, lucrurile trebuie să conspire astfel încât să regăsim evenimentele prozaice ale lumii la scara de zi cu zi. În acest scop, Feynman a arătat că, dacă analizăm mişcarea obiectelor mari – de exemplu mişcarea mingilor, avioanelor sau planetelor, toate având dimensiuni mari în comparaţie cu particulele subatomice – regula sa de a atribui numere fiecărui drum ne asigură că *toate traiectoriile, cu excepţia uneia, se anulează reciproc* atunci când se combină aportul fiecăreia. Într-adevăr, numai una din infinitatea de traiectorii contează în privinţa mişcării obiectului. Iar aceasta este exact traiectoria obţinută din legile de mişcare ale lui Newton. Acesta este motivul pentru care în viaţa de zi cu zi ni se pare că obiectele – de pildă o minge aruncată în aer – urmează o singură traiectorie, unică şi previzibilă, de la origine şi până la destinaţie. Dar, pentru obiectele microscopice, regula lui Feynman de a atribui numere traiectoriilor ne arată că multe traiectorii diferite pot contribui, şi de multe ori chiar contribuie, la mişcarea obiectului. De exemplu, în experimentul de interferenţă cu două fante, unele dintre aceste traiectorii trec prin fante diferite, dând naştere franjelor de interferenţă observate. Deci în lumea microscopică nu putem decide dacă un electron va trece printr-una din fante sau prin cealaltă. Franjele de interferenţă şi formularea alternativă a mecanicii cuantice dată de Feynman atestă fără dubiu exact contrariul.

Diverse interpretări ale unei cărţi sau ale unui film ne pot ajuta mai mult sau mai puţin să înţelegem diferite aspecte ale operei, iar la fel se întâmplă şi cu diversele abordări ale mecanicii cuantice. Deşi predicţiile lor coincid întotdeauna pe deplin, formalismul funcţiei de

undă şi suma după traiectorii a lui Feynman ne oferă moduri diferite de a privi ceea ce se întâmplă. Aşa cum vom vedea mai târziu, pentru anumite aplicaţii, una sau alta din abordări ne poate oferi un cadru explicativ inestimabil.

Ciudăţenii cuantice

După tot ce am discutat până acum, v-aţi obişnuit probabil deja cu modul radical nou în care înţelegem comportarea universului din perspectiva mecanicii cuantice. Dacă nu aţi căzut încă victimă ameţelii, după cum spunea Bohr, ciudăţeniile cuantice pe care le vom prezenta acum ar trebui să vă nedumerească.

Mecanica cuantică este mai greu de acceptat, la nivel visceral, chiar decât teoriile relativităţii, dacă ai încerca să gândeşti ca un om miniatural, născut şi crescut într-o lume microscopică. Există totuşi un aspect al teoriei care îţi poate călăuzi intuiţia, căci este trăsătura definitorie care diferenţiază modul de a raţiona clasic de cel cuantic. E vorba de *principiul de incertitudine* descoperit de fizicianul german Werner Heisenberg în 1927.

Acest principiu a apărut ca urmare al unei obiecţii la care poate v-aţi gândit mai devreme. Am observat că acţiunea de a determina fanta prin care trece fiecare electron (poziţia lui) perturbă mişcarea ulterioară a acestuia (viteza). Dar, la fel cum ne putem asigura de prezenţa cuiva fie atingându-l uşor, fie bătându-l puternic pe spate, de ce nu putem determina şi poziţia electronului folosind o sursă de lumină „din ce în ce mai slabă“, pentru a avea un impact cât mai mic asupra mişcării lui? Din punctul de vedere al fizicii secolului XIX, putem. Folosind o lampă din ce în ce mai slabă (împreună cu un detector de lumină cât mai sensibil) putem face ca impactul luminii asupra mişcării electronului aproape să dispară. Dar însăşi mecanica cuantică ne arată lacunele acestui raţionament. Când scădem intensitatea sursei de lumină, ştim acum că scădem numărul de fotoni emişi. Odată ce ajungem la o intensitate atât de mică, încât fotonii sunt emişi individual, nu mai putem scădea în continuare intensitatea luminii fără s-o stingem de tot. Există o limită cuantică fundamentală a „blândeţii“ sursei noastre. Deci există întotdeauna o perturbare minimă pe care o provocăm vitezei electronului prin măsurarea poziţiei lui.

Ei bine, raționamentul e aproape corect. Legea lui Planck ne spune că energia unui singur foton este proporțională cu frecvența lui (invers proporțională cu lungimea lui de undă). Prin folosirea unei frecvențe din ce în ce mai joase (lungime de undă din ce în ce mai mare), producem fotoni din ce în ce mai „moi". Dar aici intervine ceva. Când o undă se reflectă pe un obiect, din informația pe care o primim putem determina poziția obiectului, dar cu o *eroare egală cu lungimea de undă a undei*. Ca să înțelegeți mai bine acest lucru, imaginați-vă că încercați să localizați o stâncă mare ce iese din apă după modul în care ea afectează trecerea valurilor oceanului. Când valurile se apropie de stâncă, ele formează un tren frumos ordonat în care fiecare ciclu de undă „sus-jos" e urmat de un altul asemenea lui. După ce trec de stâncă, ciclurile de undă sunt distorsionate – semnul indubitabil al prezenței stâncii scufundate. Dar asemeni celor mai fine gradații de pe o riglă, ciclurile individuale de undă „sus-jos" sunt cele mai fine unități ale trenului de undă, așa încât examinând numai modul în care ele sunt distorsionate, putem determina poziția stâncii doar într-un interval de eroare egal cu lungimea ciclurilor de undă, deci lungimea de undă a undei. În cazul luminii, fotonii constituenți sunt, într-un anumit sens, asemeni ciclurilor individuale de undă (înălțimea ciclului de undă fiind determinată de numărul de fotoni); prin urmare, un foton poate fi folosit pentru a determina poziția unui obiect, dar eroarea determinării este egală cu lungimea de undă.

Suntem deci puși în fața unui compromis cuantic. Dacă folosim lumină cu frecvență mare (lungime de undă scurtă), putem localiza un electron cu o precizie mai mare. Dar fotonii de frecvențe înalte sunt foarte energici și influențează foarte mult viteza electronului. Dacă folosim lumină cu frecvență mică (lungime de undă mare), minimizăm impactul asupra mișcării electronului, datorită faptului că fotonii constituenți au energie mai mică, dar sacrificăm precizia în determinarea poziției electronului. Heisenberg a cuantificat această competiție și a găsit o relație matematică între precizia cu care se măsoară poziția electronului și precizia cu care se măsoară viteza lui. El a descoperit – urmând raționamentul de mai sus – că cele două sunt invers proporționale: o precizie mai mare în măsurarea poziției implică o imprecizie mai mare în măsurarea vitezei și invers. Și, lucru extrem de important, deși până acum a fost vorba doar despre o singură modalitate de determinare a poziției electronului, Heisenberg a arătat că

acest compromis între precizia de măsurare a poziție și precizia de măsurare a vitezei este un fapt fundamental ce rămâne adevărat indiferent de echipamentele de măsurare folosite sau de procedeul folosit. Spre deosebire de teoria lui Newton, sau chiar a lui Einstein, în care mișcarea unei particule e descrisă prin precizarea poziție și a vitezei, mecanica cuantică arată că la nivel microscopic *este imposibilă cunoașterea exactă a ambelor caracteristici.* Mai mult, cu cât cunoşti una cu o precizie mai bună, cu atât mai puțin precis o vei cunoaşte pe cealaltă. Deşi am vorbit aici doar despre electroni, ideile se aplică direct *tuturor* constituenților naturii.

Einstein a încercat să minimizeze această îndepărtare de fizica clasică susținând că, în ciuda faptului că raționamentele cuantice par să limiteze *cunoașterea* poziției și vitezei, electronul tot *are* o poziție și o viteză bine definite, exact aşa cum ştim dintotdeauna. Dar în cursul ultimelor două decenii progresul teoretic înregistrat, datorat în special fizicianului irlandez John Bell, și rezultatele experimentale ale lui Alan Aspect și ale colaboratorilor săi au arătat în mod convingător că Einstein s-a înșelat. Despre electroni – și despre orice altceva – nu se poate spune că se află într-un anume loc și au o anumită viteză. Mecanica cuantică ne arată că o asemenea afirmație nu numai că nu poate fi niciodată verificată experimental – din motivul explicat anterior –, dar contrazice în mod direct rezultate experimentale mai recente.

Dacă ai putea prinde un singur electron într-o cutie mare și solidă, după care ai apropia suprafețele cutiei pentru a determina poziția electronului cu o precizie din ce în ce mai mare, ai observa că electronul devine din ce în ce mai agitat. Ca și cum ar avea un acces de claustrofobie, electronul va deveni din ce în ce mai nervos, lovindu-se de pereții cutiei cu viteză din ce în ce mai mare și mai imprevizibilă. Natura nu permite constituenților ei să fie „încolțiți". În H-Bar, unde ne imaginăm că ħ este *mult* mai mare decât în lumea reală, făcând astfel ca obiectele obişnuite să fie supuse efectelor cuantice, cuburile de gheață din băuturile lui George și Gracie se ciocneau frenetic unele de altele ca și cum și ele ar fi suferit de claustrofobie. Cu toate că H-Bar este de domeniul fanteziei – în realitate ħ este extraordinar de mic – exact acest gen de stare de „claustrofobie" cuantică e prezent pretutindeni în lumea microscopică. Mişcarea particulelor microscopice devine din ce în ce mai frenetică atunci când acestea sunt examinate și închise în spații din ce în ce mai mici.

Principiul de incertitudine dă naştere şi unui efect uimitor cunoscut sub numele de *tunelare cuantică*. Dacă tragi cu o alice de plastic într-un perete de beton cu grosimea de zece picioare, fizica clasică ne confirmă ceea ce aşteptăm instinctiv să se întâmple: alicea va ricoşa din perete. Motivul este că alicea nu are suficientă energie pentru a penetra un obstacol atât de solid. Dar la nivelul particulelor fundamentale, mecanica cuantică ne arată fără echivoc că funcțiile de undă – adică undele de probabilitate – ale particulelor care constituie alicea au toate o mică parte ce se *propagă* prin perete. Asta înseamnă că există o şansă mică – dar nenulă – ca alicea să *poată* penetra peretele şi să iasă pe partea cealaltă. Cum e posibil aşa ceva? Motivul se rezumă, din nou, la principiul de incertitudine al lui Heisenberg.

Pentru a înțelege acest lucru, imaginează-ți că eşti foarte sărac şi afli deodată că o rudă îndepărtată a decedat lăsându-ți o avere imensă pe care trebuie să o revendici. Singura problemă este că nu ai banii necesari pentru a cumpăra un bilet de avion ca să ajungi la destinație. Încerci atunci să le explici prietenilor tăi situația: dacă ar putea să te ajute să treci peste acest impediment împrumutându-ţi măcar pentru un timp scurt banii de bilet, le-ai înapoia cu prisosință suma la întoarcere. Dar nimeni nu are bani de împrumutat. Îţi aduci aminte într-un târziu de un prieten mai vechi care lucrează la o companie aeriană şi îl implori să te ajute. Nici el nu poate să-ți împrumute banii, dar îți oferă o soluție. Sistemul de taxare al companiei aeriene este conceput în aşa fel încât dacă plăteşti biletul în mai puţin de 24 de ore din momentul când ajungi la destinaţie, nimeni nu-şi va da seama că biletul nu a fost plătit înainte de plecare. În felul acesta poţi să-ți revendici moştenirea.

Procedurile contabile ale mecanicii cuantice sunt asemănătoare. Aşa cum Heisenberg a arătat că există un compromis între precizia de măsurare a poziției şi viteză, în mod asemănător a demonstrat că există un compromis între precizia de măsurare a *energiei* şi *durata de timp* în care s-a făcut măsurătoarea. Mecanica cuantică afirmă că este imposibil de spus că particula cutare are energia cutare la momentul cutare. Creşterea preciziei în măsurarea energiei necesită perioade mai îndelungate de timp pentru realizarea măsurătorii. În mare, asta înseamnă că energia unei particule poate fluctua foarte mult dacă această fluctuaţie durează o perioadă scurtă de timp. Astfel, aşa cum sistemul de contabilitate al liniei aeriene îţi „permite" să „împrumuţi"

bani pentru un bilet de avion, cu condiţia să-i returnezi suficient de rapid, şi mecanica cuantică permite unei particule să „împrumute" energie dacă o va elibera într-un anumit interval de timp determinat de principiul de incertitudine al lui Heisenberg.

Matematica mecanicii cuantice arată că cu cât este mai mare bariera de energie, cu atât este mai mică probabilitatea ca această ingenioasă contabilitate microscopică să funcţioneze. Dar în cazul particulelor microscopice care ajung în faţa unei plăci de beton este posibil – şi uneori chiar se întâmplă – ca ele să împrumute suficientă energie pentru a realiza ceva imposibil din punctul de vedere al fizicii clasice: să penetreze la un moment dat şi să străbată o regiune în care iniţial n-ar avea destulă energie ca să intre. Pe măsură ce obiectele pe care le studiem devin din ce în ce mai complicate, fiind alcătuite din tot mai multe particule, o asemenea tunelare cuantică poate încă avea loc, dar devine din ce în ce mai improbabilă datorită faptului că *toate* particulele individuale trebuie să fie suficient de norocoase pentru a tunela împreună. Totuşi, peripeţii şocante, cum ar fi dispariţia trabucului lui George, cubul de gheaţă care trece prin pereţii paharului sau George şi Gracie trecând direct prin peretele barului, se *pot* întâmpla. Într-o lume a fanteziei, aşa cum este H-Bar, în care ne imaginăm că $\hbar$ este mare, astfel de tunelări cuantice sunt obişnuite. Dar legile probabilităţii mecanicii cuantice – şi în definitiv valoarea atât de mică a lui $\hbar$ în lumea reală – ne arată că, dacă te-ai izbi de un perete solid în fiecare secundă, ar trebui să aştepţi mai mult decât vârsta actuală a universului pentru a avea o şansă reală de a-l traversa într-una din încercările tale. Dar cu răbdare nesfârşită (şi longevitate pe măsură) ai putea (mai devreme sau mai târziu) apărea de partea cealaltă a zidului.

Principiul de incertitudine surprinde esenţa mecanicii cuantice. Trăsături pe care le considerăm în asemenea grad fundamentale, încât sunt în afara oricăror îndoieli – cum ar fi faptul că un obiect poate avea o poziţie şi o viteză bine definite sau o valoare bine definită a energiei la un moment de timp precizat – sunt considerate acum doar nişte consecinţe ale valorii mici a constantei lui Planck la scara mărimilor din viaţa de zi cu zi. Esenţial este faptul că, atunci când aplicăm această perspectivă cuantică texturii spaţio-temporale, ea scoate la iveală imperfecţiuni fatale în „cusătura gravitaţională", iar aceasta ne conduce la cel de-al treilea şi cel mai important conflict cu care fizica s-a confruntat în ultimul secol.

CAPITOLUL 5

Necesitatea unei noi teorii: relativitatea generală și mecanica cuantică

În ultimul secol am ajuns să înțelegem tot mai bine universul fizic. Mijloacele teoretice ale mecanicii cuantice şi ale relativității generale ne permit să facem predicții testabile în legătură cu evenimentele fizice care au loc de la dimensiuni atomice şi subatomice, la galaxii, roiuri de galaxii şi chiar până la structura universului însuşi. Este o realizare monumentală. Este incredibil că nişte ființe izolate pe o planetă ce se învârte în jurul unei stele oarecare, dintr-un colț îndepărtat al unei galaxii obişnuite, prin gândire şi experiment au putut percepe şi înțelege unele dintre cele mai misterioase caracteristici ale universului fizic. Fizicienii, prin natura lor, nu vor fi mulțumiți până când nu vor şti că cel mai profund şi mai elementar adevăr al universului a fost descoperit. Stephen Hawking numea aceasta primul pas către cunoaşterea „minții Creatorului."[32]

Există dovezi clare că mecanica cuantică şi relativitatea generală nu oferă acest nivel profund de înțelegere. Cum domeniile lor de aplicabilitate sunt atât de diferite, majoritatea situațiilor necesită folosirea mecanicii cuantice *sau* a relativității generale, dar nu a ambelor în acelaşi timp. Totuşi, în anumite condiții extreme, când obiectele sunt foarte masive *şi* foarte mici – de exemplu, în apropierea punctului central al găurilor negre sau întregul univers în momentul marii explozii – sunt necesare, pentru o înțelegere bună, atât relativitatea generală, cât şi mecanica cuantică. Dar, ca şi cum am vrea să combinăm foc şi praf de puşcă, atunci când încercăm să combinăm relativitatea generală şi mecanica cuantică provocăm o explozie catastrofală. Probleme fizice bine formulate pot duce la rezultate absurde dacă amestecăm ecuațiile celor două teorii. Pierderea sensului se manifestă de multe

ori sub forma unor predicţii de genul: probabilitatea cuantică pentru desfăşurarea unui proces nu este de 20% sau de 73%, sau de 91%, ci *infinită*. Ce semnificaţie poate avea o probabilitate mai mare decât unu, ca să nu mai vorbim de una infinită? Suntem obligaţi să tragem concluzia că există o gravă problemă. Examinând atent proprietăţile de bază ale relativităţii generale şi ale mecanicii cuantice, putem vedea că într-adevăr ceva este greşit.

Esenţa mecanicii cuantice

Când Heisenberg a descoperit principiul de incertitudine, fizica a luat o direcţie nouă, ireversibilă. Probabilităţile, funcţiile de undă, interferenţa şi cuantele, toate se bazează pe un mod radical nou de a privi realitatea. Totuşi, un fizician „clasicist" încăpăţânat mai putea spera că, atunci când totul se va lămuri, aceste deosebiri, luate împreună, vor constitui un cadru nu foarte diferit de cel anterior. Dar principiul de incertitudine a anulat clar şi definitiv orice posibilitate de a ne agăţa de trecut.

Principiul de incertitudine ne spune că universul este învolburat atunci când e examinat la o scară dimensională din ce în ce mai mică şi la o scară de timp din ce în ce mai scurtă. În capitolul anterior am arătat ce se întâmplă când încercăm să localizăm cu precizie particule elementare cum ar fi electronii: dacă trimitem asupra lor un fascicul de lumină de frecvenţă din ce în ce mai mare, măsurăm poziţia electronilor cu precizie din ce în ce mai mare, dar o facem cu preţul unei perturbări tot mai mari. Fotonii de frecvenţă înaltă au multă energie şi deci ciocnesc electronii cu putere, modificându-le viteza în mod semnificativ. Asemeni agitaţiei dintr-o cameră plină cu copii a căror poziţie instantanee o cunoşti cu mare precizie, însă nu ai nici un fel de control asupra vitezelor sau direcţiilor lor de mişcare, această incapacitate de a cunoaşte în acelaşi timp poziţia şi viteza particulelor elementare face ca lumea microscopică să fie în mod intrinsec turbulentă.

Acest exemplu redă relaţia de bază dintre incertitudine şi agitaţie, însă prezintă doar o parte a problemei. Ai putea crede, de exemplu, că incertitudinea apare doar atunci când noi – observatori inabili

ai naturii – intrăm în scenă. Dar *nu* este adevărat. Exemplul cu electronul care reacționează violent la încercarea noastră de a-l închide într-o cutie mică, „zbătându-se" cu viteză mare, ne aduce ceva mai aproape de adevăr. Chiar și fără „loviturile directe" ale fotonului perturbator al experimentatorului, viteza electronului se schimbă în mod imprevizibil de la un moment la altul. Dar nici măcar acest exemplu nu redă pe deplin uimitoarele caracteristici microscopice ale naturii dezvăluite de descoperirea lui Heisenberg. Chiar și în cel mai liniștit cadru imaginabil, cum ar fi o regiune goală a spațiului, principiul de incertitudine ne spune că, din punct de vedere microscopic, se desfășoară o formidabilă activitate. Iar această activitate devine din ce în ce mai frenetică la scări de distanță și timp din ce în ce mai mici.

Perspectiva cuantică este esențială pentru a înțelege acest lucru. Am văzut în capitolul precedent că, la fel cum există posibilitatea de a împrumuta temporar bani pentru a depăși un important obstacol financiar, o particulă așa cum este electronul poate împrumuta temporar energie pentru a depăși o barieră fizică efectivă. Acesta este un adevăr. Dar mecanica cuantică ne obligă să ducem mai departe analogia. Să ne imaginăm că cineva este constrâns să împrumute bani și merge de la un prieten la altul cerând împrumuturi. Cu cât timpul pentru care prietenul îi poate împrumuta banii este mai scurt, cu atât suma pe care el o va cere va fi mai mare. Împrumutând și returnând, împrumutând și returnând, din nou și din nou cu o nedomolită energie, el ia banii doar pentru a-i da înapoi în scurt timp. Asemeni prețului acțiunilor la bursa de pe Wall Street într-o zi cu mari fluctuații, suma pe care o posedă în fiecare moment cel care împrumută trece prin fluctuații extreme, pentru ca la sfârșit, calculând cantitatea de bani acumulată pe durata întregii zile, să observe că nu a câștigat nimic.

Principiul de incertitudine al lui Heisenberg afirmă că fluctuații frenetice similare în energie și impuls se produc continuu în univers la scară microscopică. Chiar și într-o regiune goală a spațiului – înăuntrul unei cutii goale de exemplu – principiul de incertitudine afirmă că energia și impulsul *nu pot fi precizate:* ele fluctuează între extreme ce cresc odată cu scăderea dimensiunii cutiei și a duratei de timp pe care se face observația. Este ca și cum regiunea spațială din interiorul cutiei ar fi obligată să „împrumute" energie și impuls, luând în mod repetat „împrumuturi" din univers pentru a le „returna" în scurt

timp. Dar ce poate participa la aceste împrumuturi într-o regiune „goală" şi liniştită a spaţiului? Totul. Literal. Energia (ca şi impulsul) este moneda convertibilă fundamentală. Ecuaţia $E=mc^2$ ne spune că energia poate fi transformată în materie şi viceversa. Astfel, dacă o fluctuaţie de energie este suficient de mare, ea poate face să apară instantaneu, de exemplu, un electron împreună cu corespondentul său de antimaterie, pozitronul, chiar dacă regiunea din spaţiu era iniţial goală! Cum această energie va trebui returnată rapid, aceste particule se vor anula reciproc după o perioadă de timp, eliberând energia împrumutată la crearea lor. Acelaşi lucru este valabil pentru toate celelalte forme pe care le pot lua energia şi impulsul – alte erupţii şi anihilări de particule, oscilaţii necontrolate ale câmpului electromagnetic, fluctuaţii ale câmpurilor de forţe tari şi slabe; incertitudinea cuantică ne spune că la scări microscopice universul este o scenă haotică şi frenetică. Cum obişnuia Feynman să spună în glumă, „create şi anihilate, create şi anihilate – ce pierdere de vreme."[33] Cum, în medie, împrumuturile şi returnările se anulează reciproc, o regiune goală a spaţiului pare liniştită atunci când nu este examinată cu precizie microscopică. Principiul incertitudinii afirmă însă că media macroscopică ascunde bogăţia activităţii microscopice.[34] Aşa cum vom vedea în cele ce urmează, această frenezie este *obstacolul* din calea fuziunii între relativitatea generală şi mecanica cuantică.

Teoria cuantică de câmp

În cursul anilor 1930 şi 1940, fizicienii teoreticieni în frunte cu Paul Dirac, Wolfgang Pauli, Julian Schwinger, Freeman Dyson, Sin-Itiro Tomonaga şi Feynman, ca să numim doar câţiva, s-au străduit să găsească un formalism matematic prin care să descrie agitaţia microscopică. Ei au descoperit că ecuaţia cuantică de undă a lui Schrödinger (menţionată în capitolul 4) reprezenta numai o descriere aproximativă a fizicii microscopice – o aproximaţie extrem de eficientă atunci când nu studiem prea adânc frenezia microscopică (experimental sau teoretic), dar care dă greş în caz contrar.

Partea esenţială din fizică pe care Schrödinger a ignorat-o în formularea pe care a dat-o mecanicii cuantice este relativitatea specială.

De fapt, inițial Schrödinger *a încercat* să încorporeze și relativitatea specială, însă ecuația cuantică pe care a obținut-o dădea rezultate în contradicție cu măsurătorile experimentale asupra atomului de hidrogen. Asta l-a determinat pe Schrödinger să adopte metoda „dezbină și cucerește", demult înrădăcinată în fizică: decât să încerci să încorporezi dintr-o dată într-o nouă teorie toate cunoștințele despre universul fizic, deseori este mai profitabil să faci mai mulți pași mici, care să includă repetat cele mai noi descoperiri de la limita cunoașterii științifice. Schrödinger a căutat și a găsit formalismul matematic care cuprindea dualismul undă-particulă descoperit experimental, dar care, la acel nivel timpuriu de cunoaștere, nu încorpora și relativitatea specială.[35]

Dar fizicienii au înțeles destul de repede că relativitatea specială era esențială pentru un formalism cuantic adecvat. Aceasta fiindcă frenezia microscopică impunea recunoașterea faptului că energia se poate manifesta în foarte multe feluri – așa cum rezultă din ecuația relativistă $E=mc^2$. Ignorând relativitatea specială, formalismul lui Schrödinger ignora maleabilitatea materiei, a energiei și a mișcării.

Fizicienii și-au concentrat eforturile inovatoare mai întâi spre împletirea relativității speciale cu conceptele cuantice în descrierea forței electromagnetice și a interacției ei cu materia. Printr-o serie de descoperiri inspirate, ei au creat *electrodinamica cuantică*. Acesta este un exemplu pentru ceea ce se numeste acum *teorie relativistă cuantică de câmp* sau, pe scurt, *teorie cuantică de câmp*. Este numită cuantică datorită încorporării de la bun început a tuturor proprietăților legate de probabilitate și de principiul de incertitudine, și este *teorie de câmp* pentru că introduce principiile cuantice în noțiunea clasică anterioară a câmpului de forță – în cazul de față este vorba despre câmpul electromagnetic al lui Maxwell. Și, în fine, este numită și relativistă pentru că relativitatea specială este încorporată de la început. (Pentru a obține o metaforă vizuală a câmpului cuantic, putem evoca imaginea unui câmp clasic – asemeni unui ocean de linii de câmp invizibile ce străbat spațiul – dar trebuie să aducem acestei imagini două îmbunătățiri. Mai întâi ar trebui să-ți imaginezi câmpul cuantic ca fiind compus din particule, așa cum sunt fotonii pentru câmpul electromagnetic. Apoi, va trebui să-ți imaginezi energia, sub forma maselor particulelor și a mișcării lor, mutându-se la nesfârșit de la un câmp cuantic la altul, în vibrația lor continuă prin spațiu și timp.)

Electrodinamica cuantică este probabil cea mai precisă teorie a naturii creată până acum. O ilustrare a preciziei acesteia poate fi găsită în lucrarea lui Toichiro Kinoshita, un fizician care lucrează în domeniul particulelor elementare la Universitatea Cornell şi care a folosit în ultimii 30 de ani electrodinamica cuantică pentru a calcula anumite proprietăţi ale electronilor. Calculele sale se întind pe mii de pagini şi au necesitat cele mai avansate calculatoare pentru efectuarea lor. Dar acest efort a fost răsplătit din plin: din calcule rezultă predicţii cu privire la electroni, care au fost verificate experimental cu o acurateţe mai bună decât o parte la un miliard. Acesta e un acord uluitor între o teorie şi lumea reală. Cu ajutorul electrodinamicii cuantice, fizicienii au stabilit ferm statutul fotonului de „cea mai mică cantitate posibilă de lumină" şi au descris interacţia acestuia cu particule încărcate electric, precum electronii, într-un cadru matematic complet, previzibil şi convingător.

Succesul electrodinamicii cuantice a îndemnat alţi fizicieni, în anii 1960 şi 1970, să aplice aceleaşi metode pentru a descrie forţa slabă, forţa tare şi forţa gravitaţională din perspectiva mecanicii cuantice. În ceea ce priveşte forţele slabe şi forţele tari, această abordare s-a dovedit extrem de fructuoasă. Prin analogie cu electrodinamica cuantică, fizicienii au construit o teorie cuantică de câmp pentru forţele slabe şi forţele tari, numită *cromodinamica cuantică* şi *teoria cuantică electro-slabă*. „Cromodinamica cuantică" este o denumire plină de culoare care înlocuieşte denumirea mai logică de „teorie cuantică a forţelor tari", dar e vorba doar de o denumire, fără alte implicaţii mai profunde; pe de altă parte, denumirea de „electroslabă" rezumă un reper important în înţelegerea forţelor naturii.

Prin lucrările lor distinse cu premiul Nobel, Sheldon Glashow, Abdus Salam şi Steven Weinberg au arătat că forţele slabe şi forţele electromagnetice sunt unificate în mod natural de descrierea teoretică a câmpului lor cuantic, chiar dacă manifestările lor par a fi extrem de diferite în lumea care ne înconjoară. Câmpurile forţelor slabe scad până aproape de dispariţie la toate scările de distanţe cu excepţia distanţelor subatomice, în timp ce câmpurile electromagnetice – lumina vizibilă, undele radio şi semnalele TV, razele X – sunt indiscutabil prezente la nivel macroscopic. Totuşi, Glashow, Salam şi Weinberg au arătat în esenţă că la temperaturi şi energii suficient de mari – asemeni celor care se găseau la numai o fracţiune de secundă după marea

explozie – câmpurile de forţe slabe şi electromagnetice se *dizolvă* unul în celălalt, capătă caracteristici similare şi astfel pot fi denumite mai precis, câmpuri *electroslabe*. Când temperatura scade, aşa cum s-a întâmplat în mod constant după marea explozie, forţele slabe şi forţele electromagnetice *se cristalizează în maniere* diferite faţă de forma comună pe care o aveau la temperaturi mari – printr-un proces cunoscut sub numele de „rupere de simetrie“, pe care îl vom prezenta ulterior – şi deci vor apărea ca fiind distincte în universul actual.

Şi astfel, în anii 1970, fizicienii reuşiseră să elaboreze o descriere cuantică realistă şi de succes pentru trei din cele patru forţe (tari, slabe şi electromagnetice) şi arătaseră că două din cele trei (cea slabă şi cea electromagnetică) au de fapt o origine comună (forţa electroslabă). În ultimele două decenii, fizicienii au supus această tratare cuantică a celor trei forţe negravitaţionale – a modului în care ele se comportă unele cu altele şi cu particulele de materie prezentate în capitolul 1 – unui număr enorm de verificări experimentale. Teoria a făcut faţă cu succes tuturor acestor provocări. Odată cu măsurarea experimentală a 19 parametri (masele particulelor din tabelul 1.1, sarcinile lor de forţă prezentate în tabelul din nota de final 1 de la capitolul 1, intensitatea celor trei forţe negravitaţionale din tabelul 1.2 şi alte câteva numere asupra cărora nu e nevoie să insistăm) şi introducerea acestora în teoria cuantică de câmp a particulelor de materie şi a forţelor slabe, tari şi electromagnetice, predicţiile ulterioare ale teoriei privind microcosmosul sunt în concordanţă spectaculoasă cu rezultatele experimentale. Aceasta se adevereşte până la energii atât de înalte, încât pot pulveriza materia în fragmente mai mici decât o miliardime de miliardime de metru, energii care reprezintă limita tehnologiei actuale. Din acest motiv, fizicienii numesc teoria celor trei forţe negravitaţionale şi a celor trei familii de particule de materie teoria standard sau, mai frecvent, *modelul standard* al fizicii particulelor.

Particulele mesager

Conform modelului standard, la fel cum fotonul este cel mai mic constituent al câmpului electromagnetic, şi câmpurile forţelor tare şi slabă au cei mai mici constituenţi ai lor. Aşa cum am arătat pe scurt

în capitolul 1, cele mai mici cantităţi de forţe tari sunt *gluonii,* iar cele mai mici cantităţi de forţe slabe sunt cunoscute sub numele de *bosoni de etalonare ai forţelor slabe* (mai precis, aceştia sunt bosonii W şi Z). Modelul standard ne spune că aceste particule de forţă nu au structură internă – în acest formalism ele sunt considerate elementare, la fel ca particulele din cele trei familii de materie.

Fotonii, gluonii şi bosonii de etalonare ai forţelor slabe formează mecanismul microscopic de transmitere a forţelor pe care ei le constituie. De exemplu, când o particulă încărcată electric respinge o alta cu sarcină de acelaşi semn, ne putem imagina oarecum că fiecare particulă este înconjurată de un câmp electric – un „nor“ sau o „ceaţă“ de „esenţă electrică“ – şi forţa de repulsie pe care o simte fiecare particulă apare din respingerea dintre câmpurile lor de forţe. Descrierea microscopică mai precisă a modului în care cele două particule se resping este însă puţin diferită. Un câmp electromagnetic este format dintr-un roi de fotoni; interacţia dintre două particule încărcate se produce datorită faptului că fiecare din particule „trage“ cu fotoni în cealaltă. Analog cu modul în care poţi afecta mişcarea unui patinator şi propria ta mişcare lansând bile de popice înspre el, două particule încărcate electric se influenţează una pe alta prin acest schimb de pachete mici de lumină.

O lacună importantă a analogiei cu patinatorul este aceea că schimbul de bile este întotdeauna „repulsiv“ – întotdeauna îi îndepărtează pe patinatori unul de altul. Pentru două particule cu sarcini diferite, deşi interacţionează tot prin schimbul de fotoni, forţa electromagnetică rezultată este de atracţie. Este de fapt ca şi cum fotonul nu ar transmite forţa *per se*, ci ar transmite destinatarului un *mesaj* despre felul în care acesta ar trebui să răspundă forţei în chestiune. Pentru particule încărcate cu acelaşi tip de sarcină, fotonul le transmite mesajul „despărţiţi-vă“, pe când particulelor de sarcini diferite le transmite „apropiaţi-vă“. Din acest motiv numim uneori fotonul „particula mesager“ a forţei electromagnetice. În mod similar, gluonii şi bosonii de etalonare sunt particulele mesager ale forţelor nucleare tari şi slabe. Forţa tare, care ţine cuarcii închişi în interiorul protonilor şi al neutronilor, apare datorită cuarcilor individuali care fac schimb de gluoni. S-ar putea spune că gluonii furnizează „lipiciul“ ce menţine aceste particule subatomice laolaltă. Forţa slabă, care e responsabilă pentru

anumite transmutări ale particulelor implicate în dezintegrarea radioactivă, este mediată de bosonii de etalonare ai forțelor slabe.

Simetria de etalonare

Probabil că ați observat că ceea ce lipsește din discuția noastră despre teoria cuantică a forțelor naturii este gravitația. Datorită succesului obținut în descrierea celorlalte trei forțe, le-ați putea sugera fizicienilor să găsească o teorie cuantică de câmp și pentru forța gravitațională – o teorie în care cel mai mic grăunte de câmp de forță gravitațională, *gravitonul*, ar fi considerat particula mesager. La prima vedere, această propunere pare perfect întemeiată, pentru că teoria cuantică de câmp a celor trei forțe negravitaționale scoate la iveală o similitudine incredibilă între ele și un aspect al forței gravitaționale pe care l-am întâlnit în capitolul 3.

Să ne amintim că forța gravitațională ne permite să declarăm că toți observatorii – indiferent de starea lor de mișcare – se află pe picior de egalitate. Chiar și cei despre care ne-am gândi în mod normal că au o mișcare accelerată pot pretinde a fi în stare de repaus, atât timp cât forța pe care o simt poate fi atribuită faptului că se află într-un câmp gravitațional. În acest sens, gravitația înfăptuiește simetria: asigură validitatea egală a tuturor punctelor de vedere posibile ale observatorilor și a tuturor sistemelor de referință posibile. Asemănarea cu forțele tari, slabe și electromagnetice ține de faptul că și ele sunt legate prin niște simetrii, mult mai abstracte însă decât cea asociată gravitației.

Pentru a pătrunde înțelesul destul de subtil al acestor principii de simetrie, să considerăm următorul exemplu. Așa cum apare în tabelul din nota finală 1 la capitolul 1, fiecare cuarc se prezintă în trei „culori" (culorile sunt roșu, verde și albastru, dar nu au nici o legătură cu accepțiunea vizuală a culorii, ci reprezintă numai etichete asociate cuarcilor), care determină modul în care el reacționează la forța tare, la fel cum sarcina lui electrică determină răspunsul la forța electromagnetică. Toate datele obținute concordă asupra faptului că există o simetrie printre cuarci, în sensul că interacțiunile dintre oricare doi cuarci de aceeași culoare (roșu cu roșu, verde cu verde sau albastru cu albastru)

sunt absolut identice şi, în mod similar, interacţiunile dintre doi cuarci diferit coloraţi (roşu cu verde, verde cu albastru sau albastru cu roşu) sunt de asemenea identice. De fapt, datele obţinute susţin ceva şi mai surprinzător. Dacă cele trei culori – cele trei sarcini tari diferite – pe care le poate avea un cuarc ar fi schimbate într-un anumit fel (în limbajul nostru coloristic, dacă roşu, verde şi albastru s-ar schimba cu, de exemplu, galben, indigo şi violet) şi chiar dacă detaliile acestei schimbări s-ar modifica de la un moment la altul sau de la un loc la altul, interacţiile dintre cuarci ar rămâne, din nou, neschimbate. Din acest motiv, la fel cum spunem că o sferă exemplifică simetria la rotaţie, pentru că arată la fel indiferent de modul în care o rotim în mâinile noastre sau indiferent de unghiul din care o privim, putem spune că universul exemplifică *simetria forţelor tari*. Fizica rămâne nealterată de – e absolut insensibilă la – aceste schimbări ale sarcinilor de forţă. Din motive istorice, fizicienii mai spun că simetria forţelor tari este un exemplu de *simetrie de etalonare* [*gauge symmetry*].[36]

Aici este punctul esenţial. La fel cum simetria tuturor sistemelor de referinţă din teoria generală a relativităţii necesită existenţa forţei gravitaţionale, Hermann Weyl în anii 1920 şi Chen-Ning Yang şi Robert Mills în 1950 au demonstrat că simetria de etalonare necesită şi ea existenţa altor forţe. Analog sistemelor de control ale mediului ambiant care menţin constante temperatura, presiunea şi umiditatea într-o anumită zonă prin compensarea oricăror influenţe exterioare, anumite tipuri de câmpuri de forţă vor compensa (conform lui Yang şi Mills) pe deplin schimbările sarcinilor de forţă, păstrând interacţiile fizice dintre particule absolut neschimbate. În cazul simetriei de etalonare asociată cu schimbarea sarcinilor de culoare ale cuarcilor, forţa necesară nu este alta decât însăşi forţa tare. Adică, în absenţa forţei tari, fizica *s-ar modifica* în funcţie de transformările sarcinilor de culoare specificate anterior. Acest lucru demonstrează că, în ciuda diferenţelor radicale dintre proprietăţile forţelor gravitaţionale şi ale forţelor tari (să ne reamintim că forţa gravitaţională este mult mai slabă decât forţa tare şi că ea acţionează la distanţe mult mai mari), ele au totuşi o trăsătură comună: sunt absolut necesare pentru ca universul să poată încorpora anumite simetrii. În plus, o analiză similară se poate aplica şi forţelor slabe şi electromagnetice, demonstrând că şi existenţa lor este condiţionată de altă simetrie de etalonare –

aşa-numita simetrie de etalonare slabă şi electromagnetică. Şi astfel, toate cele patru forţe sunt asociate în mod direct cu principii de simetrie.

Această trăsătură comună a celor patru forţe pare să anticipeze rezultatul pe care ni l-am propus la începutul acestui capitol. Anume că, în efortul nostru de a include mecanica cuantică în teoria generală a relativităţii, ar trebui să căutăm o teorie cuantică de câmp asemănătoare celei descoperite de fizicieni în cazul celorlalte trei forţe. De-a lungul anilor, acest mod de a gândi a determinat un grup de fizicieni prestigioşi şi distinşi să urmeze cu convingere această cale ce s-a dovedit a fi un teren minat, astfel că nimeni nu a reuşit să ajungă la capăt. În cele ce urmează vom vedea şi de ce.

Relativitatea generală şi mecanica cuantică

Domeniul obişnuit de aplicare a teoriei relativităţii generale este cel al distanţelor mari, astronomice. Pentru astfel de distanţe, teoria lui Einstein spune că absenţa masei implică faptul că spaţiul e plat, aşa cum se vede în figura 3.3. În încercarea de a combina relativitatea generală cu mecanica cuantică, va trebui să ne schimbăm radical punctul de vedere şi să examinăm proprietăţile *microscopice* ale spaţiului. Am ilustrat aceasta în figura 5.1, punând în evidenţă detalii din ce în ce mai mici din textura spaţiului. La început, mărirea imaginii nu produce schimbări deosebite; aşa cum observăm în primele trei niveluri de mărire din figura 5.1, structura spaţiului îşi păstrează aceeaşi formă de bază. Ducând mai departe raţionamentul din punctul de vedere pur clasic, ne vom aştepta ca această imagine plată a spaţiului să persiste până la cele mai mici scări de dimensiuni. Dar mecanica cuantică transformă radical această concluzie. *Totul* este supus fluctuaţiilor cuantice inerente principiului de incertitudine – chiar şi câmpul gravitaţional. Deşi principiile clasice ar sugera că spaţiul gol implică un câmp gravitaţional nul, mecanica cuantică arată că este zero în medie, dar că de fapt valoarea lui reală fluctuează în sus şi în jos datorită fluctuaţiilor cuantice. În plus, principiul de incertitudine ne spune că amplitudinea oscilaţiilor câmpului gravitaţional creşte pe măsură ce ne focalizăm atenţia asupra regiunilor mai mici ale spaţiului. Mecanica cuantică ne arată că „nimic nu acceptă să fie încolţit";

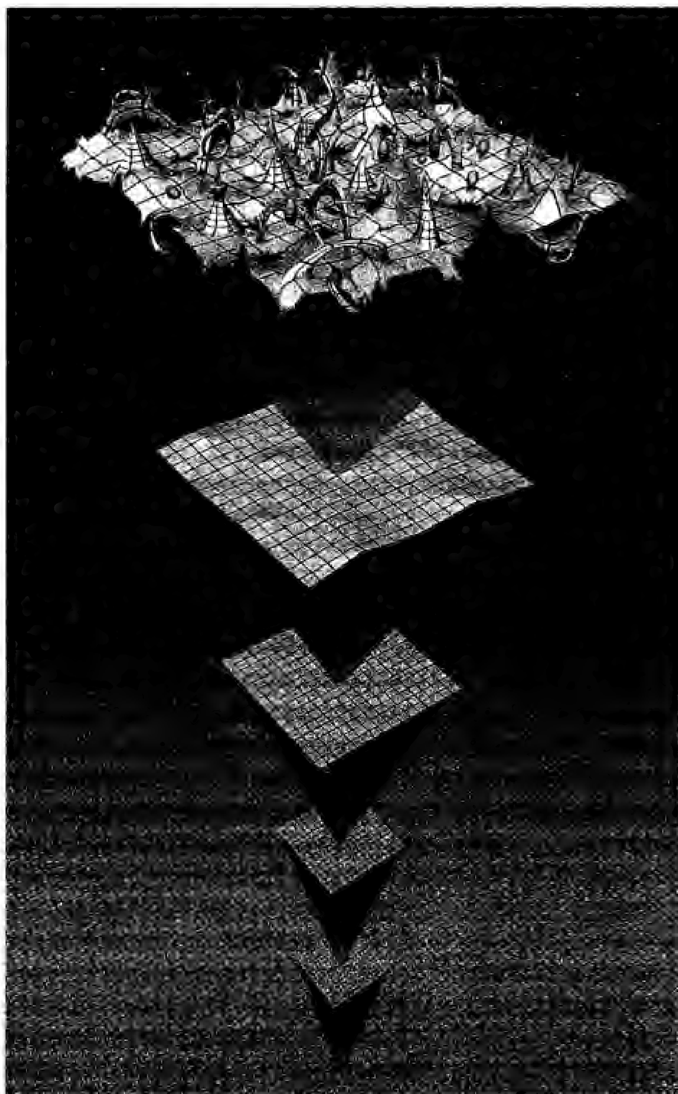


Figura 5.1 Prin mărirea succesivă a unei regiuni din spațiu putem sonda proprietățile ei ultramicroscopice. Încercările de a combina teoria generală a relativității și mecanica cuantică sunt împiedicate de apariția spumei cuantice violente la cele mai înalte niveluri de amplificare.

restrângând zona de focalizare spațială, creștem din ce în ce mai mult ondulațiile.

Cum manifestarea câmpului gravitațional se face prin curbare, aceste fluctuații cuantice se comportă ca niște distorsiuni din ce în ce mai violente ale spațiului înconjurător. Putem intui apatiția unor asemenea distorsiuni în nivelul patru de amplificare din figura 5.1. Sondând scări dimensionale și mai mici, așa cum facem la nivelul cinci al figurii 5.1, observăm că ondulațiile cuantice întâmplătoare ale câmpului gravitațional produc curbări atât de puternice ale spațiului, încât acesta nu mai poate fi aseamănat cu un obiect geometric cu ușoare curburi, ca în analogia cu membrana de cauciuc prezentată în capitolul 3. Dimpotrivă, ele vor lua o formă încrețită, turbulentă, răsucită, în genul celei ilustrate la nivelul superior al figurii 5.1. John Wheeler a introdus termenul de *spumă cuantică* pentru a descrie frenezia dezvăluită de examinarea ultramicroscopică a spațiului (și timpului) – termenul desemnează o zonă complet nefamiliară a universului, în care noțiunile convenționale de stânga și dreapta, înainte și înapoi, sus și jos (ba chiar cele de înainte și după) își pierd semnificația. La aceste scări dimensionale mici întâlnim incompatibilitatea fundamentală dintre teoria generală a relativității și mecanica cuantică. *Noțiunea de geometrie spațială netedă, principiul central al teoriei generale a relativității, este distrusă de fluctuațiile violente ale lumii cuantice la scara distanțelor mici.* La scara ultramicroscopică, trăsătura centrală a mecanicii cuantice – principiul de incertitudine – este în conflict direct cu principiul de bază al teoriei generale a relativității – modelul neted al spațiului geometric (și al spațiu-timpului).

În practică, acest conflict apare într-o manieră foarte concretă. Calculele care combină ecuațiile teoriei generale a relativității cu cele ale mecanicii cuantice tind mereu spre unul și același rezultat ridicol: *infinit*. Ca și cum te-ar pocni peste mână un profesor de modă veche, un rezultat infinit este modul în care natura ne spune că ceea ce încercăm să facem e complet greșit.[37] Ecuațiile teoriei generale a relativității nu fac față freneziei spumei cuantice.

Observați totuși că pe măsură ce ne întoarcem către distanțe mai obișnuite (urmând în sens invers secvențele desenului din figura 5.1), ondulațiile aleatoare, violente la scară mică, se anulează reciproc – cam în același mod în care contul bancar al maniacului care împrumută continuu bani nu mai arată nici o urmă a obsesiei acestuia – și astfel

conceptul de geometrie netedă a texturii universului devine din nou valabil. Este exact acelaşi fenomen care se petrece atunci când priveşti o imagine formată din puncte: de departe, punctele care compun fotografia se unesc, creând impresia unei imagini continue, ale cărei variații în luminozitate par bine de la o zonă la alta. Când examinăm însă imaginea în detaliile fine, observăm că există o mare diferență față de uniformitatea observată de departe. Acum vedem că este vorba de o aglomerare de puncte distincte, fiecare bine separat de celelalte. Dar nu uitați că puteți observa natura discretă a imaginii doar dacă o examinați în detalii fine; de departe ea pare netedă şi continuă. În mod similar, textura spațio-temporală pare netedă, mai puțin atunci când o examinăm cu o precizie ultramicroscopică. De aceea teoria generală a relativității funcționează doar la scări de dimensiuni (şi de timp) suficient de mari – scări relevante pentru aplicații astronomice tipice –, dar devine inaplicabilă în cazul distanțelor (şi intervalelor temporale) mici. Principiul central, cel al unei geometrii uşor curbate, este justificat în domeniul distanțelor mari, dar este distrus de fluctuațiile cuantice când intrăm în zona distanțelor mici.

Principiile de bază ale teoriei generale a relativității şi cele ale mecanicii cuantice ne permit să calculăm scara aproximativă de distanțe sub care ar trebui să ne coborâm pentru ca fenomenul fatal ilustrat în figura 5.1 să devină perceptibil. Valoarea mică a constantei lui Planck – cea care guvernează intensitatea efectelor cuantice – şi valoarea intrinsecă mică a interacției gravitaționale concură la un rezultat, numit *lungimea Planck*, care este inimaginabil de mic: de un milion de miliarde de miliarde de miliarde de ori mai mic decât un centimetru (10^{-33} cm).[38] Al cincilea nivel din figuria 5.1 ilustrează schematic peisajul ultramicroscopic – sub scara de dimensiuni Planck – al universului. Pentru a ne face o idee asupra dimensiunii, dacă ar fi să mărim un atom la dimensiunea universului cunoscut, lungimea Planck abia s-ar ridica la înălțimea unui copac mediu.

Vedem astfel că incompatibilitatea dintre teoria generală a relativității şi mecanica cuantică devine sesizabilă doar într-un domeniu ezoteric al universului. Din acest motiv ne-am putea întreba dacă merită să ne preocupăm de acest lucru. De fapt chiar în comunitatea fizicienilor există păreri diferite în privința acestei probleme. Deşi recunosc importanța problemei, unii fizicieni sunt bucuroşi că pot folosi separat teoria generală a relativității şi mecanica cuantică în domeniile de cercetare în care lucrează şi în care dimensiunile tipice

sunt mult mai mari decât lungimea Planck. Există însă și fizicieni profund tulburați de faptul că cei doi piloni fundamentali ai fizicii, așa cum o cunoaștem noi, sunt în esență incompatibili, indiferent de distanțele ultramicroscopice ce trebuie sondate pentru a pune în evidență problema. Ei susțin că această incompatibilitate denotă o lipsă gravă de înțelegere a universului fizic. Această opinie se bazează pe un punct de vedere nedemonstrat, dar foarte rezonabil, și anume acela că universul, dacă este înțeles la cel mai adânc și elementar nivel, poate fi descris de o teorie perfect logică ale cărei părți sunt unite în mod armonios. Și bineînțeles, indiferent cât de important este acest lucru pentru domeniul lor de cercetare, majoritatea fizicienilor nu pot crede că, în esență, cea mai profundă înțelegere teoretică pe care o avem asupra universului este de fapt o cârpeală matematică incoerentă a două formalisme explicative bine închegate, însă aflate în conflict.

Fizicienii au făcut numeroase încercări de a modifica, într-un fel sau altul, fie teoria generală a relativității, fie mecanica cuantică, pentru a evita acest conflict, dar încercările, deși de multe ori îndrăznețe și ingenioase, au eșuat de fiecare dată.

Mai precis, au eșuat până la descoperirea teoriei supercorzilor.[39]

Partea a III-a
Simfonia cosmică

CAPITOLUL 6

Totul este muzică: bazele teoriei corzilor

Muzica a oferit dintotdeauna metafore potrivite celor preocupaţi de tainele universului. De la antica pitagoreică „muzică a sferelor“' şi până la „armonia naturii“, care ne-au călăuzit căutările timp de secole, noi încercăm să desluşim printr-un efort colectiv cântecul naturii şi în preumblarea molcomă a astrelor, şi în puzderia de scântei azvârlite de particulele subatomice. Descoperirea teoriei supercorzilor a făcut însă ca metaforele muzicale să modeleze realitatea, întrucât această teorie sugerează că lumea microscopică este plină de corzi minuscule, ale căror vibraţii orchestrează evoluţia cosmosului. Vântul schimbării adus de teoria supercorzilor suflă acum printr-un univers eolian.

În modelul standard, constituenţii elementari ai universului sunt consideraţi a fi entităţi punctiforme (de dimensiune zero), fără nici o structură internă. Oricât de solidă este această abordare (după cum am mai menţionat, practic orice predicţie făcută de modelul standard asupra microcosmosului a fost verificată până la o precizie de o miliardime de miliardime de metru, adică până la precizia limită a tehnologiei moderne), modelul standard nu poate totuşi constitui o teorie completă sau finală deoarece nu include gravitaţia. Mai mult, încercările de a introduce gravitaţia în formalismul său cuantic au eşuat din cauza fluctuaţiilor violente ce apar în structura spaţiului la distanţe ultramicroscopice – mai exact, la distanţe mai mici decât lungimea Planck. Acest conflict nerezolvat a dus la înteţirea eforturilor oamenilor de ştiinţă de a dobândi o înţelegere mai profundă a naturii. Astfel, în 1984, fizicianul Michael Green, pe atunci la Colegiul Queen Mary, şi John Schwartz de la Institutul Tehnologic din California au adus primele dovezi convingătoare că acest nivel mai adânc de înţelegere ar putea fi furnizat de teoria supercorzilor (sau, pe scurt, teoria corzilor).

Teoria corzilor produce o nouă şi profundă schimbare a modului în care sunt descrise proprietăţile ultramicroscopice ale universului – schimbare ce, aşa cum fizicienii au înţeles încetul cu încetul, a modificat teoria relativităţii generale a lui Einstein exact atât cât a fost necesar pentru a o face compatibilă cu legile mecanicii cuantice. Conform teoriei corzilor, constituenţii elementari ai universului nu sunt particule punctiforme (adică de dimensiune zero). Ei sunt minuscule filamente unidimensionale (corzi), ca nişte fire elastice infinit de subţiri, vibrând necontenit în toate sensurile. Să nu ne lăsăm însă induşi în eroare de această analogie: spre deosebire de firele elastice obişnuite, alcătuite la rândul lor din atomi şi molecule, corzile (deci firele elastice ale teoriei corzilor) sunt însăşi esenţa materiei. Teoria propune ca acestea să fie ingredientele ultramicroscopice care formează particulele din care la rândul lor sunt alcătuiţi atomii. Corzile teoriei corzilor sunt atât de mici – lungimea lor medie este aproximativ egală cu lungimea Planck –, încât par a fi punctiforme chiar şi atunci când sunt examinate cu cele mai puternice aparate.

Şi totuşi, simpla schimbare a constituenţilor fundamentali ai universului din particule punctiforme în şiraguri de corzi are consecinţe cu bătaie lungă. Prima şi cea mai importantă din aceste consecinţe este că teoria rezolvă în fine conflictul dintre mecanica cuantică şi teoria generală a relativităţii. Aşa cum vom vedea, natura de obiect cu structură spaţială extinsă a corzii reprezintă elementul nou crucial care permite încorporarea celor două teorii într-unul şi acelaşi formalism. În al doilea rând, teoria corzilor este pe drept cuvânt o teorie unificată deoarece toată materia şi toate forţele derivă dintr-un unic element fundamental: coarda vibrantă. În sfârşit, după cum vom vedea în capitolele ce urmează, dincolo de celelalte calităţi remarcabile, teoria corzilor ne obligă încă o dată să ne schimbăm perspectiva din care privim spaţiul şi timpul.[40]

Scurtă istorie a teoriei corzilor

În 1968, un tânăr fizician teoretician pe nume Gabriele Veneziano încerca să găsească sensul unor observaţii experimentale legate de forţele nucleare tari. Veneziano, pe atunci cercetător la CERN, acceleratorul European de la Geneva, lucra la această problemă de un

număr de ani, până când într-o bună zi i-a venit o idee fantastică. Spre propria sa surprindere, şi-a dat seama că o formulă matematică exotică, născocită din pură plăcere intelectuală de renumitul matematician elvețian Leonhard Euler cu vreo două sute de ani mai devreme – aşa-numita funcție beta a lui Euler –, părea să descrie „dintr-o lovitură" o mulțime de proprietăți ale particulelor care interacționează prin forța tare. Observația lui Veneziano a dus la încorporarea matematică a numeroase proprietăți ale forțelor tari, iar acest lucru a declanşat o frenezie a cercetărilor menite să aplice funcția beta a lui Euler, precum şi anumite generalizări ale acesteia la descrierea bogăției de date ce se strângeau de la acceleratoarele de particule din toată lumea. Şi totuşi, într-un anumit sens, observația lui Veneziano era incompletă. Ca acele formule memorate pe care un şcolar le foloseşte fără a le înțelege sensul sau justificarea, funcția beta dădea rezultate bune, dar nimeni nu știa de ce. Formula pornise în căutarea propriei sale explicații. Lucrurile s-au schimbat în 1970, când prin lucrările lui Yoichiro Nambu, de la Universitatea din Chicago, Holger Nilsen, de la Institutul Niels Bohr, şi Leonard Susskind, de la Universitatea Standford, s-a lămurit misterul ascuns în spatele formulei lui Euler. Aceşti fizicieni au arătat că, dacă particulele elementare ar fi nişte corzi vibrante mici, unidimensionale, atunci interacțiile lor tari ar fi descrise chiar de funcția lui Euler. Iar dacă aceste corzi sunt suficient de scurte, ele pot părea punctiforme şi astfel teoria se pune în acord cu observațiile experimentale.

Cu toate că aceasta oferea o teorie intuitivă simplă şi frumoasă, nu a trecut mult şi au apărut probleme în descrierea forțelor tari cu ajutorul corzilor. La începutul anilor '70, mai multe experimente la energii înalte, capabile să testeze lumea subatomică la niveluri din ce în ce mai adânci, au arătat că o serie de predicții ale noii teorii erau în conflict direct cu realitatea observată. În acelaşi timp, cromodinamica cuantică – teoria cuantică de câmp care descrie forțele tari, bazată pe particule punctiforme – se dezvolta, iar succesul ei zdrobitor în descrierea interacției tari a dus la desconsiderarea teoriei corzilor.

Majoritatea celor care lucrau în fizica particulelor au ajuns astfel să creadă că viitorul teoriei corzilor se află în coşul de gunoi. Totuşi, câțiva cercetători pasionați şi-au păstrat speranța şi au continuat să lucreze în această direcție. Schwartz, de exemplu, credea că „structura matematică a teoriei corzilor era atât de frumoasă şi avea atâtea proprietăți uimitoare, încât trebuia să aibă o semnificație profundă".[41] Unul

din neajunsurile pe care fizicienii le-au găsit teoriei corzilor era că aceasta e mult prea bogată. Teoria conținea configurații de corzi vibrante care aveau proprietăți similare cu cele ale gluonilor, justificându-și astfel pretențiile de la început de a fi o teorie a forțelor tari. Dar pe lângă acestea, mai conținea o mulțime de alte particule „mesager" care nu păreau să aibă nici un fel de legătură cu observațiile experimentale. În 1974, Schwarz și Joël Scherk de la Ecole Normale Supérieure au făcut o propunere curajoasă, care a transformat acest neajuns într-o virtute. Studiind proprietățile enigmatice ale configurațiilor „mesager" de corzi vibrante, au remarcat că acestea corespundeau perfect cu cele ale ipoteticului mesager al forței gravitaționale – gravitonul. Considerat cea mai mică „încărcătură"' de forță gravitațională, gravitonul nu a fost niciodată observat. Cu toate acestea, teoreticienii îi pot prezice anumite proprietăți fundamentale, iar Scherk și Schwarz au remarcat că aceste proprietăți puteau fi obținute întocmai prin anumite configurații de corzi vibrante. Bazându-se pe aceasta, Scherk și Schwarz au avansat ideea că teoria corzilor a avut un eșec inițial numai fiindcă fizicienii i-au restrâns ținta într-un mod nejustificat. Teoria corzilor *nu* este numai o teorie a forțelor tari, au proclamat ei; ea este o teorie ce include și gravitația.[42]

Comunitatea fizicienilor nu a primit însă această propunere cu prea mult entuziasm. Schwarz își amintește că „lucrarea noastră a fost universal ignorată".[43] Calea progresului fusese deja presărată cu numeroase încercări nereușite de a uni gravitația cu mecanica cuantică. Teoria corzilor se dovedise deja greșită în încercarea ei inițială de a descrie forța tare și în consecință multora li se părea lipsit de sens ca unei asemenea teorii să i se încredințeze o misiune și mai importantă. Mai grav încă, studiile ce au urmat la sfârșitul anilor '70 și începutul anilor '80 au scos la iveală faptul că teoria corzilor și mecanica cuantică aveau chiar propriile lor conflicte subtile. Așadar, după toate aparențele, forța gravitațională rezista încă o dată încorporării sale într-o descriere microscopică a universului.

Aceasta era situația până în 1984. Într-o lucrare de referință ce rezuma peste un deceniu de cercetări intense, în mare parte ingnorate și de multe ori respinse pur și simplu de majoritatea fizicienilor, Green și Schwarz au arătat că subtilele conflicte cuantice care afectau teoria corzilor puteau fi înlăturate. Mai mult, ei au arătat chiar că teoria rezultată avea o arie de cuprindere atât de largă, încât putea include

toate cele patru forțe și toată materia. Pe măsură ce vestea acestei descoperiri se răspândea în lumea fizicii, sute și sute de cercetători care se ocupau cu fizica particulelor elementare își întrerupeau proiectele la care lucrau pentru a asalta din toate direcțiile ceea ce părea a fi cel din urmă câmp de bătălie teoretic în vechea provocare de a înțelege funcționarea cea mai ascunsă a universului.

Mi-am început studiile postuniversitare în 1984 la Oxford. Eu studiam cu entuziam tot ce era legat de teoria cuantică a câmpului, teoriile de etalonare și relativitatea generală, dar printre studenții mai mari era răspândită ideea că fizica particulelor nu mai avea aproape nici un viitor. Modelul standard ocupa deja o poziție solidă în fizică, iar succesul său remarcabil în prezicerea rezultatelor experimentelor indica faptul că totala lui confirmare era numai o chestiune de timp și ținea de verificarea detaliilor. A trece însă dincolo de limitele sale, pentru a-i adăuga gravitația și, eventual, pentru a explica bazele sale experimentale – adică cele 19 numere sintetizând masele particulelor elementare, sarcinile de forță ale acestora, precum și tăria relativă a acestor forțe, numere ce sunt cunoscute din experiment, dar nu sunt înțelese teoretic – era o misiune atât de descurajantă, încât toți fizicienii, cu excepția celor mai curajoși, au refuzat provocarea. Dar, șase luni mai târziu, situația s-a schimbat radical. Succesul lui Green și Schwartz a ajuns din vârful ierarhiei științifice până jos, la studenții din primul an de studii postuniversitare, iar sentimentul electrizant de a participa la un moment important din istoria fizicii a înlăturat plictiseala care domnea. Unii din noi lucram cu tenacitate până târziu în noapte, încercând să stăpânim aria vastă de fizică teoretică și matematică abstractă necesare înțelegerii teoriei corzilor.

Perioada 1984–1986 a ajuns să fie cunoscută drept „prima revoluție în teoria supercorzilor“. În acea perioadă au fost scrise de cercetătorii din întreaga lume mai mult de o mie de lucrări științifice legate de teoria corzilor. Aceste lucrări au arătat că numeroase aspecte ale modelului standard – aspecte descoperite cu multă trudă în decenii de cercetări – apar *în mod firesc* și simplu din structura grandioasă a teoriei corzilor. Așa cum spunea Michael Green, „când faci cunoștință cu teoria corzilor și îți dai seama că aproape toate marile realizări ale fizicii din ultima sută de ani apar – și apar cu o deosebită eleganță – din niște premise atât de simple, îți dai seama că această teorie atât de atrăgătoare e fără egal“.[44] Mai mult, pentru multe din aceste aspecte,

după cum vom vedea mai departe, teoria corzilor oferă o explicație mult mai completă și mai satisfăcătoare decât modelul standard. Aceste progrese au convins pe mulți fizicieni că teoria corzilor parcursese deja o bună bucată din distanța ce o despărțea de țelul propus, și anume de a deveni teoria unificată fundamentală. Cercetătorii care lucrau în teoria corzilor se izbeau însă mereu de o uriașă piatră de încercare. În fizica teoretică poți întâlni adeseori ecuații care sunt pur și simplu prea complicate ca să le poți înțelege sau analiza. În mod normal fizicienii nu se lasă bătuți, ci încearcă să rezolve aceste ecuații măcar aproximativ. În teoria corzilor, situația este încă mai complicată. Până și *obținerea ecuațiilor* s-a dovedit a fi atât de dificilă, încât numai variante aproximative ale lor au putut fi deduse. Prin urmare, cei care lucrează în teoria corzilor trebuie să se limiteze la găsirea unor soluții aproximative la ecuații aproximative. După câțiva ani de progres spectaculos în cursul primei revoluții a teoriei corzilor, fizicienii și-au dat seama că aproximațiile folosite nu puteau aduce răspunsuri la anumite întrebări fundamentale, iar astfel progresul teoriei era zădărnicit. În lipsa unor căi concrete de a depăși acest obstacol, mulți fizicieni care lucrau în teoria corzilor, devenind din ce în ce mai frustrați, s-au întors la vechile lor direcții de cercetare. Pentru cei care au rămas însă în acest domeniu, sfârșitul anilor '80 și începutul anilor '90 au fost o perioadă grea. Frumusețea și speranțele teoriei corzilor erau ca o prețioasă comoară ce fusese ferecată într-un sipet căruia nimeni nu-i putea afla cheia; doar printr-un mic orificiu ce fusese făcut în acest sipet o puteam privi, spre propria noastră tortură. Lungi intervale de secetă erau întrerupte periodic de descoperiri importante, dar devenise clar pentru toată lumea că în acest domeniu era nevoie de tehnici noi, mai puternice decât aproximațiile existente.

Apoi, într-o prelegere care a tăiat răsuflarea celor prezenți la Universitatea California de Sud, la conferința Strings 1995 – prelegere ce a reușit să uimească un public format din fizicienii cei mai importanți ai lumii –, Edward Witten a anunțat planul următoarei etape în dezvoltarea teoriei, inițiind astfel cea de-a „doua revoluție a supercorzilor". În momentul de față, fizicienii lucrează din plin pentru finisarea metodelor ce promit să depășească obstacolele care barau drumul teoriei. Dificultățile ce ne așteaptă vor testa sever capacitățile fizicienilor, dar lumina de la capătul tunelului, deși încă îndepărtată, ar putea deveni vizibilă.

În capitolul acesta şi în câteva din cele ce urmează vom prezenta teoria corzilor aşa cum a apărut ea în urma primei revoluţii şi a cercetărilor dinaintea celei de-a doua revoluţii. Din când în când însă vom insera idei răzbătând din cea de-a doua; prezentarea ultimelor realizări ale teoriei corzilor o vom lăsa pentru capitolele 12 şi 13.

Înapoi la atomii grecilor antici?

După cum am menţionat la începutul acestui capitol şi am ilustrat în figura 1.1, teoria corzilor susţine că dacă particulele, presupuse a fi punctiforme în modelul standard, ar fi examinate cu o precizie mult mai mare decât cea de care dispunem astăzi, fiecare ar apărea ca o buclă minusculă şi vibrantă, formată dintr-un singur fir.

Pentru motive ce urmează să fie lămurite, lungimea firului unei astfel de bucle este aproximativ egală cu lungimea Planck, adică este de o sută de miliarde de miliarde (10^{20}) de ori mai mică decât nucleul unui atom. Nu este atunci de mirare că experimentele de astăzi nu pot pune în evidenţă structura microscopică fibroasă a materiei: corzile sunt minuscule chiar şi la scara particulelor subatomice. Pentru a arăta direct că o coardă nu este o particulă punctiformă, am avea nevoie de un accelerator care să poată izbi materie de materie la energii de milioane de miliarde de ori mai mari decât energiile furnizate de acceleratoarele deja construite. Vom prezenta pe scurt implicaţiile extraordinare pe care le are înlocuirea particulelor punctiforme cu corzi, dar înainte de aceasta vom răspunde la o întrebare fundamentală: din ce sunt alcătuite corzile?

Există două răspunsuri posibile la această întrebare. Primul este că aceste corzi sunt într-adevăr fundamentale – ele sunt „atomii", adică acei constituenţi indivizibili în cel mai pur sens, exact aşa cum grecii antici şi i-au imaginat. Ca absolut cei mai mici constituenţi ai tuturor lucrurilor, ei reprezintă capătul drumului – ultima păpuşă matrioşca* în numeroasele straturi ale structurii microcosmosului. Din această pespectivă, deşi corzile au întindere spaţială, problema compoziţiei lor nu are sens. Dacă corzile ar fi alcătuite din entităţi mai mici, atunci nu ar mai fi fundamentale. Aceste entităţi ar înlocui corzile şi ar

---

* Păpuşi ruseşti identice ca formă, dar de diferite dimensiuni, care ies una din alta. (*N. t.*)

pretinde statutul de constituenţi fundamentali ai universului. Folosind o analogie lingvistică, paragrafele sunt alcătuite din propoziţii, propoziţiile din cuvinte, iar cuvintele sunt compuse din litere. Ce formează însă o literă? Din punct de vedere lingvistic, aceasta marchează capătul drumului sau baza ierarhiei. Literele sunt litere – sunt cărămizile fundamentale ale limbajului scris; nu există structură mai fină. Nu are sens să investigăm compoziţia lor. În acelaşi fel, o coardă este pur şi simplu o coardă – şi cum nu există nimic mai simplu, nu e compusă din nici o altă substanţă.

Acesta este primul răspuns. Cel de-al doilea răspuns se bazează pe simplul fapt că nu putem şti dacă teoria corzilor este corectă şi nici dacă este teoria ultimă a naturii. Dacă teoria corzilor este întradevăr greşită, atunci putem uita atât de corzi, cât şi de întrebările legate de alcătuirea lor. Deşi această posibilitate nu poate fi exclusă, cercetările efectuate de la mijlocul anilor '80 până în ziua de azi susţin cu putere ideea că acest lucru este foarte improbabil. Pe de altă parte, în decursul istoriei am învăţat că, pe măsură ce înţelegem natura mai adânc, descoperim şi ingredienţi mai mici, care constituie niveluri din ce în ce mai subtile ale materiei. O altă posibilitate deci, în cazul în care corzile nu reprezintă teoria finală a naturii, este că acestea formează un alt strat al cepei cosmice, strat vizibil la dimesiuni comparabile cu lungimea Planck, dar care nu e stratul final. În acest caz, corzile ar fi alcătuite din structuri şi mai mici. Fizicienii şi-au pus această problemă şi continuă să urmărească această posibilitate. În studiile teoretice actuale apar indicii interesante conform cărora corzile ar avea structură, dar nu există încă o dovadă clară în acest sens. Numai timpul şi o muncă de cercetare asiduă vor avea ultimul cuvânt de spus.

Cu excepţia câtorva speculaţii din capitolele 12 şi 15, în toate discuţiile noastre vom trata corzile în maniera propusă de primul răspuns – adică vom considera corzile drept ingredientele fundamentale ale naturii.

Unificare prin teoria corzilor

Pe lângă incapacitatea de a încorpora forţa gravitaţională, modelul standard mai are un neajuns: nu există nici o explicaţie pentru detaliile construcţiei lui. Din ce motiv a selectat natura lista de particule şi

forțe schițată în capitolele precedente și prezentată în tabelele 1.1 și 1.2? De ce au cei 19 parametri ce descriu cantitativ acești ingredienți valorile pe care le au? Nu poți să nu ai senzația că numărul și proprietățile lor sunt arbitrare. Există un nivel de înțelegere mai profund, ascuns în spatele acestor ingredienți aparent întâmplători, sau detaliile universului în care trăim au fost „alese" de pura întâmplare?

Modelul standard nu poate oferi o explicație, din moment ce lista de particule și proprietățile lor sunt preluate în model din măsurătorile experimentale. Așa cum cunoscând evoluția pieței bursiere nu poți calcula valoarea portofoliului tău fără a cunoaște investițiile pe care le-ai făcut, la fel și modelul standard nu poate fi folosit pentru a face predicții fără a avea date privind anumite proprietăți ale particulelor, furnizate de experiment.[45] După ce fizicienii experimentatori obțin aceste date, teoreticienii le pot folosi pentru a face predicții testabile, de exemplu ce se întâmplă dacă cutare și cutare particulă sunt izbite una de alta într-un accelerator. Dar modelul standard nu poate explica proprietățile particulelor elementare enumerate în tabelele 1.1 și 1.2 mai bine decât ar putea o persoană oarecare să explice investițiile tale la bursă făcute acum zece ani.

De fapt, dacă experimentatorii ar aduce dovezi că microcosmosul conține alte particule, interacționând cu alt tip de forțe, aceste schimbări ar putea fi încorporate relativ ușor în modelul standard, prin

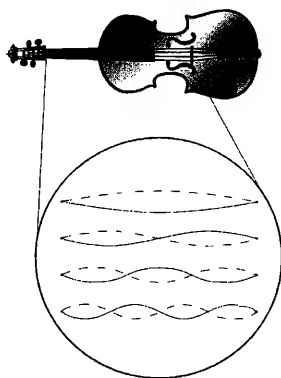


Figura 6.1. Corzile de vioară pot vibra în moduri rezonante, așa încât un număr întreg de creste și văi se încadrează perfect între cele două capete.

schimbarea parametrilor de intrare ai teoriei. Structura modelului standard poate încorpora o întreagă gamă de posibilități, fiind în sensul acesta prea flexibilă pentru a explica proprietățile particulelor elementare.

Teoria corzilor e complet diferită. Ea este un edificiu teoretic unic și inflexibil. Nu are nevoie de date de intrare, cu excepția unui singur număr, pe care îl vom prezenta mai jos și care fixează scara de mărimi pentru măsurători. Puterea sa explicativă cuprinde întregul microcosmos. Ca să înțelegem aceste lucruri, haideți să analizăm mai întâi niște „corzi" mai familiare, și anume corzile unei viori. Fiecare din aceste corzi poate avea un număr imens (de fapt un număr infinit) de moduri diferite de vibrație, cunoscute sub denumirea de rezonanțe, cum sunt cele din figura 6.1. Acestea sunt moduri ondulatorii cu crestele și văile ce apar de-a lungul corzii egal depărtate și cuprinse exact între cele două extremități ale corzii. Urechile noastre percep diferitele rezonanțe de vibrație ca note muzicale diferite. Corzile teoriei corzilor au proprietăți similare. Sunt moduri de vibrație rezonante pe care corzile le pot suporta în virtutea echidistanței dintre creste și văi, și care se încadrează perfect pe toată lungimea corzilor. Câteva exemple sunt arătate în figura 6.2. Ideea centrală a teoriei este următoarea: așa cum diferite moduri de vibrație ale unei corzi de vioară reprezintă diferite note muzicale, *diferitele moduri de oscilație ale unei corzi fundamentale produc mase și sarcini de forță diferite.* Cum aceasta este ideea de bază, se cuvine s-o reformulăm. Conform teoriei corzilor, proprietățile unei „particule" elementare – adică masa și diversele sale sarcini de forță – sunt determinate de modul de vibrație al corzii sale interne.

Această asociere este cel mai ușor de înțeles în cazul masei particulelor. Energia unui mod particular de vibrație depinde de ampli-

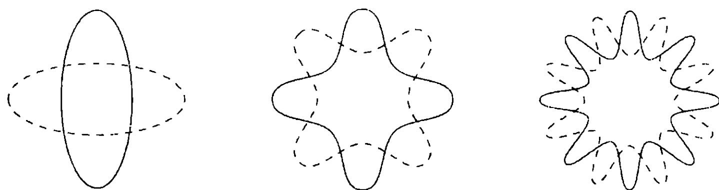


Figura 6.2. Buclele din teoria corzilor pot vibra în moduri rezonante – la fel ca în cazul corzilor de vioară – un număr întreg de creste și văi potrivindu-se perfect de-a lungul întinderii spațiale a buclelor.

tudinea – diferența de înălțime dintre creastă și vale – și de lungimea sa de undă – distanța dintre două creste consecutive. Cu cât este mai mare amplitudinea și mai scurtă lungimea de undă, cu atât este mai mare energia. Acest lucru este ușor de înțeles intuitiv – vibrațiile mai frenetice au energie mai mare, pe când cele mai liniștite au energie mai mică. Două astfel de exemple sunt prezentate în figura 6.3. De asemenea, pentru a înțelege de ce energia crește cu creșterea amplitudinii, să ne amintim cum corzile unei viori ciupite viguros vor vibra puternic, în timp ce corzile ciupite cu delicatețe vor vibra slab. Știm din teoria restrânsă a relativității că energia și masa sunt două fețe ale aceleiași monede: energie mai mare înseamnă masă mai mare și viceversa. Prin urmare, în teoria corzilor *masa* unei particule elementare este determinată de *energia* modului de vibrație al corzii sale interne. Particulele mai grele conțin corzi care vibrează mai energic, în timp ce particulele mai ușoare conțin corzi ce vibrează mai slab.

Din moment ce masa unei particule determină proprietățile sale gravitaționale, putem asocia direct vibrația corzii și reacția particulei la forța gravitațională. Deși raționamentul este mai abstract, fizicienii au observat că paralele similare există și între alte detalii ale modurilor de vibrație ale corzilor și proprietățile lor în raport cu alte forțe. De exemplu, sarcina electrică, sarcina slabă și sarcina tare purtate de o anumită coardă sunt determinate de modul exact în care aceasta vibrează. Mai mult, aceeași idee se aplică și în cazul particulelor mesager. Particule precum fotonii, bosonii de etalonare ai forței slabe și gluonii sunt alte exemple de stări rezonante de vibrație ale corzilor. Iar o importanță deosebită între toate modurile de oscilație ale corzilor au acelea care reproduc exact proprietățile gravitonului, garantându-ne că gravitația este parte integrantă a teoriei corzilor.[46]

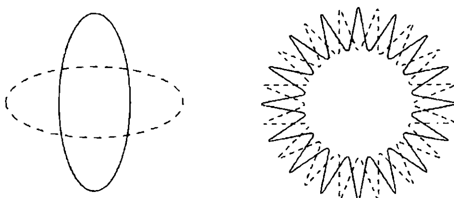


Figura 6.3. Modurile de vibrație mai frenetice au mai multă energie decât cele mai puțin frenetice.

Vedem aşadar că, în conformitate cu teoria corzilor, proprietăţile fiecărei particule elementare sunt consecinţe ale modului particular de vibraţie a corzii interne. Această perspectivă diferă drastic de cea adoptată de fizicieni înainte de descoperirea teoriei corzilor; în perspectiva mai veche, diferenţele dintre particulele fundamentale erau explicate spunând că, de fapt, fiecare specie de particule „este alcătuită dintr-un material diferit". Cu alte cuvinte, deşi aceste particule sunt considerate a fi elementare, ele sunt totuşi alcătuite din materiale diferite. Deşi fiecare particulă este considerată elementară, tipul de „material" din care e alcătuită este diferit. Astfel, de exemplu „materialul" din care sunt făcuţi electronii are sarcină electrică negativă, în timp ce „materialul" neutrinilor nu are sarcină electrică. Teoria corzilor schimbă perspectiva radical susţinând că „materialul" tuturor particulelor este acelaşi. Fiecare particulă elementară este alcătuită dintr-o singură coardă – sau, mai bine zis, fiecare particulă *este* o coardă unică – şi toate corzile sunt identice. Diferenţele dintre particule apar deoarece corzile care le corespund se află în rezonanţe de vibraţie diferite. Cele ce par a fi particule elementare diferite sunt de fapt „note" diferite pe o coardă fundamentală. Universul – format dintr-un număr enorm de astfel de corzi vibrante – este asemenea unei simfonii cosmice.

Acest rezumat arată că teoria corzilor oferă într-adevăr un perfect cadru unificator. Fiecare particulă de materie şi fiecare mesager de forţă constă dintr-o coardă a cărei vibraţie îi este ca o amprentă. Întrucât orice proces, eveniment ori întâmplare din lumea fizică, la nivelul său cel mai elementar, poate fi descris în termeni de forţe ce acţionează între aceşti constituenţi fundamentali ai materiei, teoria corzilor oferă promisiunea de a furniza o singură descriere atotcuprinzătoare şi unificatoare a universului: o teorie despre tot (T.O.E.).

Muzica teoriei corzilor

Chiar dacă teoria corzilor a eliminat ideea de particulă elementară fără structură, conceptele încetăţenite se înlătură greu, mai ales atunci dacă pot descrie realitatea cu precizie, până la cele mai mici distanţe accesibile experimental. Urmând şi noi această practică, vom continua să folosim termenul de „particulă elementară", dar prin aceasta vom înţelege „ceea ce apare a fi o particulă elementară, însă în realitate

este de fapt o infimă coardă vibrantă". În secțiunea precedentă am propus ca masele și sarcinile de forță ale acestor particule elementare să fie rezultatul modului în care corzile lor interne vibrează. Aceasta ne conduce la următoarea observație: dacă am găsi cu precizie modurile rezonante de vibrație ale corzilor fundamentale – adică, „notele" pe care acestea le pot produce – am putea explica proprietățile observabile ale tuturor particulelor elementare. Prin formalismul teoriei corzilor suntem deci în stare, pentru prima oară, să *explicăm* proprietățile particulelor observate în natură.

Ajunși aici, ar trebui să „punem mâna" pe o coardă și s-o „ciupim" în toate felurile pentru a determina modurile în care poate vibra. Dacă teoria corzilor este corectă, modurile de vibrație astfel obținute ar trebui să reproducă proprietățile materiei și ale particulelor elementare așa cum sunt ele observate și enumerate în tabelele 1.1 și 1.2. Evident, corzile sunt prea mici pentru a putea aplica literalmente acest procedeu. Ciupirea unei corzi se poate face însă în mod teoretic, folosind metode matematice. Pe la mijlocul anilor '80, mulți partizani ai teoriei corzilor credeau că aceste descrieri matematice urmau în curând să poată explica proprietățile universului până în cele mai mici detalii. Unii fizicieni entuziaști credeau chiar că T.O.E. a fost în sfârșit descoperită. Mai târziu însă, privind înapoi la experiența acumulată, fizicienii și-au dat seama că euforia a fost prematură. Teoria corzilor are caracteristicile unei T.O.E., dar rămân o seamă de obstacole care ne împiedică să calculăm spectrul de vibrații al corzii cu precizia necesară pentru o comparație cu rezultatele experimentale. De aceea în momentul de față nu știm dacă proprietățile fundamentale ale universului, expuse în tabelele 1.1 și 1.2, pot fi descrise prin teoria corzilor. Așa cum vom vedea în capitolul 9, pe baza anumitor ipoteze de lucru, din teoria corzilor putem deduce un univers cu proprietăți care sunt în acord calitativ cu observațiile experimentale legate de particulele și forțele cunoscute, dar este peste puterea acestei teorii să facă predicții cantitative detaliate. Și astfel, deși formalismul teoriei corzilor, spre deosebire de modelul standard bazat pe particule punctiforme, poate explica de ce particulele și forțele au proprietățile pe care le au, nu suntem deocamdată în stare să obținem aceste proprietăți prin calcul. Vom arăta totuși în următoarele capitole un lucru remarcabil, și anume că teoria corzilor, deși nu-i putem determina proprietățile în amănunt,

este atât de bogată şi de extinsă încât prezice o întreagă constelaţie de fenomene fizice noi şi ne ajută să le înţelegem esenţa.

În capitolele care urmează vom prezenta dificultăţile teoriei, dar este bine ca înainte de a trece la amănunte să înţelegem aceste dificultăţi la nivel general. Corzile sau firele din lumea care ne înconjoară sunt tensionate în mod diferit. De exemplu şnurul de la pantof este mult mai puţin întins decât coarda unei viori. Pe de altă parte, amândouă sunt mult mai puţin tensionate decât corzile de oţel ale unui pian. Astfel, unicul număr de care teoria corzilor are nevoie pentru a-şi defini scara globală este tensiunea din buclele sale. Dar cum putem determina această tensiune? Dacă am putea ciupi o coardă fundamentală, am vedea cât de întinsă este, iar astfel am putea să-i măsurăm tensiunea, aşa cum facem în cazul corzilor obişnuite. Deoarece corzile fundamentale sunt atât de mici, nu putem aplica acest procedeu şi va trebui să utilizăm o metodă indirectă. În 1974, când Schrek şi Schwarz au propus ca un anumit mod de vibraţie a corzilor să fie chiar gravitonul, au exploatat acest procedeu indirect şi au prezis tensiunea corzilor. Calculele lor au arătat că intensitatea forţei transmisă prin acest model de graviton este invers proporţională cu tensiunea corzii. Cum gravitonul se presupune că este particula care mediază forţa gravitaţională – o forţă destul de slabă –, tensiunea calculată ca fiind suportată de coarda fundamentală are valoarea colosală de o mie de miliarde de miliarde de miliarde de miliarde (10^{39}) de tone forţă – aşa-numita tensiune Planck. Prin urmare, corzile fundamentale sunt extrem de rigide în comparaţie cu corzile care ne sunt familiare, iar aceasta are trei consecinţe importante.

Trei consecinţe ale rigidităţii corzilor

În primul rând, în timp ce capetele unei corzi de pian sau de vioară sunt fixate pe suporţi, capetele unei corzi fundamentale nu pot fi fixate pe nici un suport. Tensiunea imensă dintr-o coardă face ca buclele acesteia să se contracte până la dimensiuni infime. Calcule detaliate arată că tensiunea Planck suportată de corzi se transpune în dimensiuni tipice ale acestora de ordinul lungimii Planck – 10^{-33} centimetri – aşa cum am menţionat anterior.[47]

În al doilea rând, datorită tensiunii enorme, în teoria corzilor, energia tipică de vibrație a unei bucle este foarte mare. Ca să înțelegem asta, să observăm că o coardă poate fi făcută să vibreze cu atât mai greu cu cât este mai întinsă. De exemplu, este mult mai ușor să ciupești o coardă de vioară și s-o faci să vibreze, decât să faci același lucru cu o coardă de pian. Prin urmare, două corzi care vibrează exact în același mod, dar au tensiuni diferite, au și energii diferite. Coarda cu tensiune mai mare are și energie mai mare, din moment ce este necesară mai multă energie pentru a o pune în mișcare.

Aceasta ne atrage atenția că energia unei corzi care vibrează este determinată de două lucruri: modul în care vibrează (moduri mai violente corespund unor energii mai mari) și tensiunea de-a lungul ei (tensiuni mai mari corespund unor energii mai mari). La prima vedere, acest gen de descriere ne-ar putea face să ne credem că luând moduri de oscilație din ce în ce mai domoale – altfel spus, moduri de vibrație cu amplitudini din ce în ce mai mici și cu cât mai puține ondulații – o coardă ar putea înmagazina din ce în ce mai puțină energie. Dar, după cum am văzut într-un context diferit în capitolul 4, mecanica cuantică ne învață că un asemenea raționament este greșit. Ca în cazul tuturor vibrațiilor și perturbațiilor ondulatorii, mecanica cuantică impune ca și acestea să existe în cantități discrete. Grosso modo, așa cum angajatul de la depozitul de mărfuri are asupra lui o sumă de bani care este multiplu întreg al celei mai mici unități a monedei, la fel și energia înmagazinată într-un mod de vibrație al unei corzi este un multiplu întreg al unei anumite unități de energie. În particular, cea mai mică unitate de energie este proporțională cu tensiunea corzii (și mai este proporțională și cu numărul de ondulații care corespund acestui mod de vibrație), în timp ce multiplul întreg este determinat de amplitudinea modului de vibrație.

Punctul-cheie al acestei discuții este următorul: din moment ce unitatea de energie este proporțională cu tensiunea din coardă și din moment ce această tensiune este enormă, atunci și unitățile fundamentale de energie sunt enorme la scara obișnuită a fizicii particulelor elementare. Ele sunt multiplu a ceea ce este cunoscut sub numele de *energie Planck*. Pentru a ne imagina scara acestor mărimi, dacă am transforma energia Planck în masă, folosind faimoasa formulă a lui Einstein $E=mc^2$, am obține o masă de aproximativ zece miliarde de miliarde (10^{19}) de ori mai mare decât masa protonului. Această

masă pantagruelică – după standardele particulelor elementare – este cunoscută ca *masa Planck*; ea e aproximativ egală cu masa unui grăunte de nisip sau cu a unui ansamblu de un milion de bacterii de mărime medie. Iar astfel, în teoria corzilor, masa tipică echivalentă a unei bucle vibrante este un număr întreg de mase Planck. Fizicienii exprimă acest lucru în mod obişnuit spunând că scara „naturală" sau „tipică" de energie (sau de masă) a teoriei corzilor este scara Planck.

Aceasta ridică o întrebare crucială legată direct de scopul nostru de a reproduce proprietăţile particulelor din tabelele 1.1 şi 1.2: dacă scara „naturală" de energii a teoriei corzilor este de vreo zece miliarde de miliarde de ori mai mare decât energia corespunzătoare masei protonului, cum este posibil ca această teorie să fie aplicabilă particulelor mult mai uşoare – electroni, cuarci, fotoni etc. – care alcătuiesc lumea din jurul nostru?

Răspunsul ni-l dă din nou mecanica cuantică. Principiul de nedeterminare ne asigură că nimic nu poate fi în repaus total. Toate obiectele au un anumit „tremur" cuantic, fiindcă dacă nu l-ar avea am cunoaşte cu precizie absolută atât unde se află, cât şi cu ce viteză se mişcă, contrazicând astfel principiul lui Heisenberg. Acelaşi lucru este valabil şi pentru buclele din teoria corzilor; indiferent cât de placidă ar părea o coardă, ea va avea întotdeauna o anumită cantitate de vibraţie cuantică. Un lucru remarcabil, aşa cum s-a arătat pentru prima oară în anii '70, este că o anumită parte din energia vibraţiilor cuantice *anulează* o parte din energia oscilaţiilor corzilor prezentate mai sus (şi ilustrate în figurile 6.2 şi 6.3). Într-adevăr, ciudăţenia mecanicii cuantice face ca energia asociată cu mişcarea cuantică a unei corzi să fie *negativă*, iar acest lucru *reduce* energia totală conţinută de o coardă care oscilează cu o cantitate aproximativ egală cu energia Planck. Aceasta înseamnă că cele mai joase energii ale modurilor de oscilaţie ale unei corzi, ale cărei energii ne-am aştepta, cu naivitate, să fie aproximativ egale cu energia Planck (adică, 1 înmulţit cu valoarea energiei Planck), sunt în mare parte anulate, apărând astfel energii nete de oscilaţie relativ scăzute – energii ale căror echivalente în masă sunt apropiate de masele particulelor de materie şi de forţă prezentate în tabelele 1.1 şi 1.2. Prin urmare, aceste moduri de oscilaţie cu energiile cele mai joase sunt cele care ar trebui să facă legătura dintre descrierea teoretică a corzilor şi lumea accesibilă experimental a fizicii particulelor. Ca exemplu important, Scherk şi Schwarz au descoperit că,

pentru modul de vibrație ale cărui proprietăți corespund particulei mesager graviton, reducerile de energie sunt *totale*, rezultând o particulă de forță gravitațională de masă zero. Este exact ceea ce se așteaptă de la graviton; forța gravitațională se transmite cu viteza luminii și doar particulele fără masă pot călători cu această viteză limită. Dar combinațiile de oscilații cu energie joasă sunt mai degrabă excepții de la regulă. O coardă oscilantă tipică ar corespunde unei particule a cărei masă este de milioane și milioane de ori mai mare decât cea a protonului.

Aceasta ne arată că particulele fundamentale relativ ușoare prezentate în tabelele 1.1 și 1.2 ar fi, într-un anumit sens, cele care formează ceața fină ce acoperă oceanul zbuciumat al corzilor energetice. Chiar și o particulă grea cum e cuarcul top, cu o masă de aproximativ 189 de ori mai mare decât cea a protonului, poate lua naștere dintr-o coardă oscilantă doar dacă enorma energie caracteristică scării Planck este anulată de mișcarea cuantică până la mai puțin de o parte dintr-o sută de milioane de miliarde de părți. E ca și cum ai participa la jocul *Prețul e corect*, ți s-ar oferi zece miliarde de miliarde de dolari și ți-ar spune să cumperi produse ce vor costa – care vor anula, în limbajul folosit până acum – întreaga sumă, mai puțin 189 de dolari, nici un dolar mai mult, nici un dolar mai puțin. Să faci o asemenea cheltuială enormă și atât de precisă în același timp, fără să fii informat în prealabil despre prețurile produselor, este un test dificil de perspicacitate până și pentru cei mai mari experți în cumpărături din lume. În teoria corzilor, unde moneda de cumpărare este energia, și nu dolarul, calculele aproximative au arătat că asemenea anulări de energie *pot* într-adevăr avea loc, dar, din motive ce vor deveni din ce în ce mai clare în capitolele ce vor urma, verificarea rezultatelor cu o precizie atât de înaltă depășește pentru moment orizontul nostru teoretic. Chiar și așa, după cum am arătat mai sus, vom vedea că există multe alte proprietăți ale teoriei corzilor care nu necesită calcule atât de exacte și care, prin urmare, pot fi înțelese foarte bine.

Aceasta ne conduce la cea de-a treia consecință a valorii enorme a tensiunii din corzi. Corzile pot efectua un număr infinit de tipuri de oscilații. De exemplu în figura 6.2 sunt prezentate începuturile unei serii infinite de posibilități, care se continuă cu oscilații cu numere și mai mari de ondulații. Nu implică însă aceasta că seriei de mai sus îi corespunde o serie interminabilă de particule elementare, punând

astfel, aparent, teoria corzilor în conflict cu situația experimentală rezumată în tabelele 1.1 și 1.2?

Răspunsul este da. Dacă teoria corzilor este adevărată, fiecărui mod rezonant de oscilație din seria infinită de mai sus ar trebui să-i corespundă o particulă elementară. Totuși, unul din punctele cruciale ale teoriei este acela că, datorită tensiunii mari a corzilor, toate aceste moduri de vibrație, cu exceptia câtorva, corespund unor particule foarte grele (aceste câteva moduri de oscilație sunt cele a căror energie este anulată aproape perfect de energia de vibrație cuantică). Iarăși prin „greu" înțelegem ceva cu o masă de multe ori mai mare decât masa Planck. Cum cele mai puternice acceleratoare de particule nu pot atinge decât energii de ordinul a o mie de mase protonice, adică mai puțin de un milion de miliarde de ori masa Planck, suntem încă foarte departe de posibilitatea de a căuta în laborator aceste noi particule prezise de teoria corzilor.

Există totuși modalități indirecte de a le căuta. De exemplu, energiile implicate în nașterea universului ar fi fost suficient de înalte pentru a produce o mulțime de asemenea particule. În general nu ne-am aștepta ca acestea să supraviețuiască până în zilele noastre, din moment ce astfel de particule „super-grele" sunt în general instabile, pierzându-și enorma masă prin descompunerea într-o cascadă de particule din ce în ce mai ușoare și ajungându-se în final la particulele cunoscute, relativ ușoare, care alcătuiesc lumea din jurul nostru. Și totuși este posibil ca o asemenea stare de oscilație „super-grea" a corzilor – o relicvă a marii explozii – să fi supraviețuit până în prezent. Găsirea unei asemenea particule, așa cum vom arăta mai pe larg în capitolul 9, ar fi o descoperire monumentală.

Gravitația și mecanica cuantică în teoria corzilor

Formalismul unificat al teoriei corzilor este frumos și incitant. Dar latura sa cu adevărat atrăgătoare e capacitatea de a rezolva conflictele dintre forța gravitațională și mecanica cuantică. Aduceți-vă aminte că problema îmbinării teoriei relativității generale cu mecanica cuantică apare atunci când principiul central al primeia – acela că spațiul și timpul constituie o structură geometrică netedă curbată – se confruntă

cu caracteristicile esenţiale ale celei de-a doua – şi anume că totul în univers, inclusiv structura spaţiului şi timpului, manifestă fluctuaţii cuantice cu atât mai turbulente cu cât acestea sunt măsurate pe distanţe mai mici. La distanţe de ordinul lungimii Planck, ondulaţiile cuantice sunt atât de violente, încât distrug noţiunea de curbare netedă a spaţiului; cu alte cuvinte, dărâmă edificiul teoriei relativităţii generale.

Teoria corzilor reduce ondulaţiile cuantice prin netezirea proprietăţilor spaţiului vizibile la distanţe foarte mici. La întrebarea ce înseamnă aceasta cu adevărat şi cum poate teoria să rezolve conflictul, putem da un răspuns simplu, direct, dar şi un răspuns mai precis. Vom prezenta pe rând ambele răspunsuri.

Răspunsul simplu

Deşi pare grosolană, unul dintre mijloacele prin care putem studia structura unui obiect este de a arunca în el cu diverse obiecte şi de a observa cum ricoşează ele. De exemplu, noi vedem datorită faptului că ochii noştri captează informaţia transportată de fotonii care ricoşează din obiectele la care privim, iar creierul decodifică această informaţie. Acceleratoarele de particule se bazează pe acelaşi principiu: ele aruncă mici bucăţi de materie – cum ar fi electronii şi protonii – unele asupra altora sau asupra diverselor ţinte, iar sisteme sofisticate de detectori analizează rămăşitele împroşcate în urma ciocnirii pentru a determina arhitectura obiectelor cercetate.

Ca regulă generală, *dimensiunea particulei de probă* folosite fixează limita inferioară a scării de lungime pe care o putem percepe. Pentru a înţelege importanţa acestei afirmaţii, imaginaţi-vă că Slim şi Jim se hotărăsc să se cultive înscriindu-se la cursuri de desen. Pe măsură ce primul semestru se scurge, Jim e tot mai invidios şi îl provoacă pe Slim la un concurs neobişnuit. El propune ca fiecare să ia câte un sâmbure de piersică, să-l fixeze într-o menghină şi să deseneze cât mai corect această natură moartă. Ceea ce este neobişnuit în acest concurs propus de Jim este că nici el, nici Slim nu vor avea voie să se uite la sâmburi. Ei trebuie să afle dimensiunile, forma şi celelalte caracteristici ale sâmburelui doar prin aruncarea de obiecte (dar nu fotoni!) în acesta şi prin observarea modului în care ele ricoşează, după cum

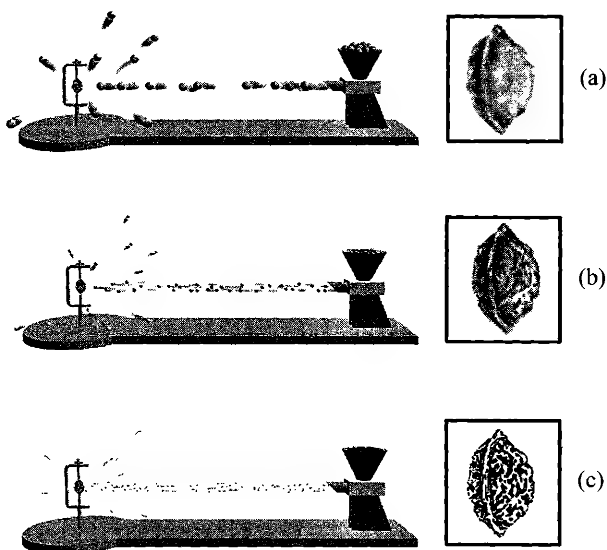


Figura 6.4. Un sâmbure de piersică e fixat într-o menghină și e desenat doar observând felul în care ricoșează obiectele – proiectilele de „probă" – aruncate asupra lui. Folosind proiectile tot mai mici – (a) bile, (b) alice de cinci milimetri, (c) alice de jumătate de milimetru – pot fi desenate detalii tot mai fine.

e ilustrat în figura 6.4. Fără știrea lui Slim, Jim îi umple tunul cu bile (așa cum se vede în figura 6.4 (a)), în timp ce propriul său tun îl umple cu alice de plastic de 5 mm (ca în figura 6.4 (b)). Amândoi încep să tragă și astfel concursul începe.

După o vreme, cel mai bun desen pe care Slim a fost în stare să-l realizeze este cel din figura 6.4 (a). Prin observarea traiectoriilor bilelor ricoșate, el a aflat că sâmburele este mic și are o suprafață tare. Dar asta a fost tot ce a putut deduce. Bilele sunt mult prea mari pentru a fi influențate de micile neuniformități de pe suprafața sâmburelui. Când Slim s-a uitat la desenul lui Jim (figura 6.4 (b)) a fost surprins să vadă că fusese întrecut. Dar o singură privire aruncată către tunul lui Jim a fost suficientă pentru a-și da seama de șmecheria la care recursese acesta: proiectilele folosite de Jim sunt suficient de mici pentru ca direcția lor de ricoșare să fie influențată de unele dintre

proeminenţele mai mari de pe suprafaţa sâmburelui. Şi astfel, trăgând în sâmbure multe alice de 5 mm şi observând traiectoriile după care acestea ricoşează, Jim a fost în stare să deseneze o imagine mai detaliată. Ca să nu rămână mai prejos, Slim şi-a umplut tunul cu particule de probă şi mai mici – alice de jumătate de milimetru –, suficient de mici pentru a pătrunde în cele mai fine neregularităţi ale suprafeţei şi a fi împrăştiate de acestea. Observând modul în care au ricoşat aceste particule de probă penetrante, el a putut face desenul câştigător, expus în figura 6.4 (c).

Învăţătura pe care o tragem din acest mic concurs este următoarea: dimensiunea particulelor de probă nu trebuie să fie mult mai mare decât caracteristicile fizice supuse examinării; altfel, ele vor fi insensibile la aceste caracteristici.

Raţionamentul rămâne valabil, bineînţeles, şi dacă vrem să sondăm sâmburele mai în profunzime, spre exemplu pentru a-i determina structura atomică şi subatomică. Alicele de jumătate de milimetru nu vor furniza nici o informaţie folositoare; ele sunt cu siguranţă prea mari pentru a avea rezoluţia necesară sondării structurii atomice. De aceea acceleratoarele de particule folosesc drept probe protoni sau electroni, care datorită dimensiunilor mici sunt potriviţi pentru scopul avut în vedere. La scară subatomică, unde conceptele cuantice înlocuiesc raţionamentele clasice, cea mai potrivită măsură a sensibilităţii unei particule de probă este lungimea ei de undă cuantică, care fixează intervalul de eroare în determinarea poziţiei sale. Acest lucru ilustrează discuţia noastră din capitolul 4 în legătură cu principiul de nedeterminare al lui Heisenberg, în care am arătat că eroarea făcută atunci când folosim ca probă o particulă punctiformă (acolo fotonii erau particulele de probă, dar rezultatul e valabil pentru toate celelalte) este aproximativ egală cu lungimea sa de undă cuantică. Simplu spus, sensibilitatea unei particule punctiforme este redusă de mişcarea cuantică la fel cum precizia bisturiului unui chirurg este compromisă dacă mâinile acestuia tremură. Dar să ne amintim că în capitolul 4 am remarcat un fapt important, şi anume că lungimea de undă cuantică a unei particule este invers proporţională cu impulsul ei, care la rândul său creşte cu energia particulei. Şi astfel, prin creşterea energiei unei particule punctiforme, lungimea ei de undă cuantică se scurtează din ce în ce mai mult – nivelarea datorată acestei proprietăţi cuantice este redusă – şi astfel particula poate fi folosită la investigarea structurilor

fizice din ce în ce mai fine. În mod intuitiv, particulele de energie mai mare au putere de penetrare mai mare, aşa încât pot reda structuri mai fine.

Din această perspectivă, diferenţa dintre particulele punctiforme şi firele de corzi devine manifestă. La fel ca în cazul alicelor de plastic cu care se cerceta suprafaţa sâmburelui, întinderea spaţială inerentă a unei corzi o împiedică să sondeze structura obiectelor de dimensiuni semnificativ mai mici decât lungimea sa – în acest caz fiind vorba de structuri ce apar la o scară mai mică decât lungimea Planck. Mai precis, în 1988, David Gross, pe atunci la Universitatea din Princeton, şi studentul său Paul Mende au arătat că atunci când efectele cuantice sunt luate în considerare creşterea continuă a energiei unei corzi nu duce la o creştere continuă a capacităţii acesteia de a sonda structuri mai fine, în opoziţie directă cu ceea ce se întâmplă în cazul unei particule punctiforme. Ei au descoperit că atunci când energia unei corzi creşte, ea poate la început sonda structuri la o scară de lungime mai mică, la fel ca o particulă punctiformă de energie mare. Dar când energia ei creşte peste valoarea necesară investigării structurilor la scara Planck, energia suplimentară nu îmbunătăţeşte rezoluţia corzii de probă. În schimb, coarda creşte în dimensiune, *scăzându-i* astfel sensibilitatea la distanţe scurte. De fapt, deşi dimensiunea tipică a unei corzi este lungimea Planck, dacă am pompa suficientă energie în ea – o cantitate de energie care întrece orice imaginaţie, dar care ar fi putut fi atinsă de marea explozie – am face-o să crească la dimensiuni *macroscopice*, devenind o sondă grosieră a microcosmosului! Este ca şi cum o coardă, spre deosebire de o particulă punctiformă, ar avea două posibilităţi de netezire: prima ar fi datorată mişcării cuantice, ca şi la particula punctiformă, iar a doua, extensiei sale spaţiale inerente. Creşterea energiei unei corzi scade netezirea datorată primeia, dar, în final, creşte netezirea datorată celei de-a doua. Concluzia este că indiferent cât ne-am strădui, natura extinsă a corzii ne împiedică s-o folosim pentru sondarea fenomenelor la distanţe mai scurte decât lungimea Planck.

Întregul conflict dintre relativitatea generală şi mecanica cuantică se datorează proprietăţilor structurii spaţiului la distanţe mai mici decât lungimea Planck. *Dacă însă aceste distanţe nu pot fi sondate de către constituenţii elementari ai universului, atunci nici aceşti constituenţi şi nici altceva compus din ei nu poate fi afectat de presupusele*

oscilații cuantice dezastruoase existente la distanțe foarte mici. Este ca și cum am atinge cu mâna o suprafață de granit perfect șlefuită. Deși la nivel microscopic granitul este discontinuu, granular și denivelat, degetele noastre nu pot sesiza aceste variații pe distanțe foarte scurte și astfel suprafața pare perfect netedă. Degetele noastre butucănoase și mari netezesc discontinuitățile microscopice. La fel și în cazul corzilor, întinderea lor spațială le limitează sensibilitatea la distanțe foarte mici. Nu pot detecta variații la distanțe mai scurte decât lungimea Planck. Ca atunci când atingem granitul cu degetele, coarda netezește fluctuațiile ultramicroscopice dezordonate ale câmpului gravitațional. Deși fluctuațiile remanente sunt destul de mari, ele sunt totuși netezite suficient pentru a pune în acord mecanica cuantică și teoria generală a relativității. Putem mai ales spune că au dispărut acele infinități fatale (menționate în capitolul precedent) care apar în orice descriere cuantică a gravitației bazată pe particule punctiforme.

O diferență esențială între analogia cu granitul și subiectul real al discuției noastre privind structura spațiului este aceea că *există* modalități prin care discontinuitățile microscopice ale suprafeței granitului pot fi puse în evidență: instrumente de sondare mai fine și mai precise decât degetele noastre pot oricând fi folosite aici. Un microscop electronic poate pune în evidență structura suprafeței cu o rezoluție mai bună de o milionime de centimetru; această rezoluție este suficientă pentru a distinge numeroasele imperfecțiuni ale suprafeței. În schimb, în teoria corzilor nu există nici o posibilitate de a distinge „imperfecțiunile" structurii spațiului la o scară de lungimi sub lungimea Planck. Într-un univers guvernat de legile teoriei corzilor, ideea convențională că putem diseca natura până la distanțe oricât de mici, fără nici o limită, nu este adevărată. *Există* o limită și ea se manifestă înainte de a avea de-a face cu spuma cuantică dezastruoasă ilustrată în figura 5.1. Astfel, într-un sens ce va fi lămurit în capitolele următoare, am putea spune chiar că presupusele ondulații cuantice furtunoase ce ar apărea sub lungimea Planck *nici nu există.* Un pozitivist ar spune că ceva exista doar dacă poate fi observat și măsurat – cel puțin în principiu. Cum coarda se presupune că este cel mai elementar obiect din univers și cum până și ea este prea mare pentru a fi afectată de oscilațiile violente ce apar în structura spațiului la distanțe sub lungimea Planck, atunci, în conformitate cu teoria corzilor, aceste oscilații nu pot fi măsurate și prin urmare nici nu există.

Un număr de magie

Poate că aceste afirmații nu vă sunt pe plac. În loc să arătăm cum îmblânzim ondulațiile cuantice sub lungimea Planck, s-ar părea că ne folosim de lungimea finită a corzilor pentru a ascunde definitiv problema. Am rezolvat ceva în felul ăsta? Da, am rezolvat. Următoarele două observații ne vor ajuta s-o dovedim.

În primul rând, argumentul anterior arată că presupusele fluctuații spațiale problematice care apar sub lungimea Planck sunt un rezultat al formulării relativității generale și mecanicii cuantice într-un cadru care presupune particulele punctiforme. Așadar, într-un anumit sens, conflictul central al fizicii teoretice contemporane a fost o problemă pe care singuri ne-am creat-o. Fiindcă anterior ne-am imaginat că toate particulele de materie și de forță sunt punctiforme, am fost obligați să luăm în calcul proprietățile universului la scări de distanțe arbitrar de mici. Iar la distanțe extrem de mici dăm peste dificultăți insurmontabile. Teoria corzilor ne spune că întâlnim astfel de probleme numai pentru că nu înțelegem adevăratele reguli ale jocului; noile reguli ne spun că există o limită a distanțelor la care putem sonda universul – și chiar, în sens real, o limită pentru cât de fin putem aplica noțiunea convențională de distanță la structura ultramicroscopică a cosmosului. Vedem acum că presupusele fluctuații spațiale nedorite apăreau în teoriile noastre pentru că nu cunoșteam aceste limite și astfel eram împinși de modelele de particule punctiforme să încălcăm în mod grosolan aceste limite impuse de realitatea fizică.

Dată fiind simplitatea acestei soluții pentru aplanarea conflictului dintre relativitatea generală și mecanica cuantică, v-ați putea întreba de ce a trebuit să treacă atât de mult timp până când cineva să sugereze că descrierea bazată pe particule punctiforme era doar o idealizare și că particulele elementare din lumea reală au de fapt extindere spațială. Aceasta ne aduce la punctul al doilea al discuției noastre. Cu mult timp în urmă, unele dintre cele mai luminate minți ale fizicii teoretice, cum ar fi Pauli, Heisenberg, Dirac și Feynmann, *au sugerat* că particulele constituente ale universului s-ar putea de fapt să nu fie puncte matematice, ci mai degrabă „bule“ sau „grăunțe“ oscilante. Dar, împreună cu alți teoreticieni, ei au descoperit că este foarte dificil să construiești o teorie în care constituentul fundamental nu este o particulă punctiformă și care să fie în același timp în concordanță cu

principiile fizice fundamentale ale mecanicii cuantice, cum ar fi conservarea probabilității cuantice (astfel încât obiectele fizice să nu dispară instantaneu, fără nici o urmă, din univers), și imposibilitatea transmiterii informației cu viteză mai mare decât viteza luminii. Din mai multe perspective, cercetările lor au arătat că unul sau ambele principii de mai sus sunt violate când se renunță la paradigma particulei punctiforme. Prin urmare, pentru multă vreme a părut imposibil de găsit o teorie cuantică realistă care să se bazeze pe altceva decât particulele punctiforme. Caracteristica într-adevăr impresionantă a teoriei corzilor este că în peste douăzeci de ani de cercetări riguroase, care au scos la iveală multe caracteristici neobişnuite, ea respectă toate proprietățile indispensabile, inerente oricărei teorii fizice de bun-simț. În plus, prin modul de vibrație caracteristic gravitonului, teoria corzilor este o teorie cuantică a gravitației.

Răspunsul mai precis

Răspunsul simplu surprinde esența faptului că teoria corzilor reuşeşte acolo unde teoriile bazate pe particule punctiforme eşuează. Aşa că, dacă vreți, puteți sări la secțiunea următoare fără să pierdeți firul logic al discuției noastre. Dar deoarece am prezentat în capitolul 2 ideile esenţiale ale relativității speciale, avem deja instrumentele necesare pentru a descrie mai precis modul în care teoria corzilor liniştește violenta agitație cuantică.

În răspunsul mai precis ne bazăm pe aceeaşi idee centrală ca şi în răspunsul simplu, dar o exprimăm direct la nivelul corzilor. Vom face asta prin comparația ceva mai detaliată a sondelor proiectil care constau din particule punctiforme cu sondele proiectil care constau din corzi. Vom vedea că natura extinsă a corzilor netezeşte informația pe care am putea-o obține prin sonde punctiforme şi deci că ne scapă de situațiile fizice întâlnite la distanțe ultrascurte, care sunt răspunzătoare pentru dilema centrală a fizicii contemporane.

Vom analiza mai întâi modul în care interacționează particulele punctiforme, dacă acestea ar exista, şi cum ar putea fi ele folosite ca sonde fizice. Interacția de bază este aceea în care două particule punctiforme se ciocnesc – deci traiectoriile lor se intersectează ca în

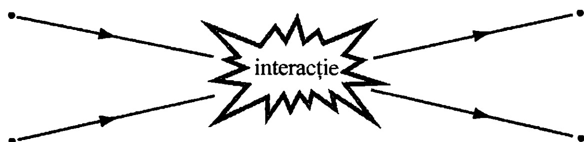


Figura 6.5. Două particule interacționează – se „izbesc" una de alta – iar traiectoria fiecăreia e deviată.

figura 6.5. Dacă aceste particule ar fi bile de biliard, ele s-ar ciocni și fiecare ar fi deviată pe o nouă traiectorie. Teoria cuantică de câmp bazată pe particule punctiforme arată că în principiu același lucru se întâmplă și când se ciocnesc două particule elementare – ele sunt împrăștiate una de cealaltă, după care își continuă mișcarea pe traiectorii deviate – numai că detaliile sunt puțin diferite.

Pentru concretețe și simplitate, să ne imaginăm că una din cele două particule este un electron, iar cealaltă este antiparticula sa, pozitronul. Când materia și antimateria intră în coliziune, ele se anihilează într-o sclipire de energie pură, producând, de exemplu, un foton.[48] Pentru a deosebi traiectoria rezultată a fotonului de traiectoriile anterioare ale electronului și pozitronului, vom urma o convenție tradițională în fizică și o vom desena printr-o linie ondulată. În mod tipic, fotonul va călători o scurtă vreme, după care își va elibera energia obținută din anihilarea electron-pozitron, producând o altă pereche electron-pozitron, cu traiectorii ca acelea indicate în extrema dreaptă a figurii 6.6. Prin urmare, două particule sunt aruncate una spre alta, interacționează prin forța electromagnetică, iar în final se deplasează

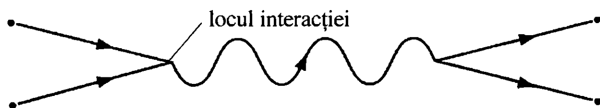


Figura 6.6 În teoria cuantică de câmp, o particulă și antiparticula sa se pot anihila reciproc, producând un foton. Apoi acest foton dă naștere unei alte perechi particulă-antiparticulă, mișcându-se de-a lungul unor traiectorii diferite de cele inițiale.

pe traiectorii deviate; avem deci un şir de evenimente oarecum similar cu descrierea pe care am dat-o ciocnirii bilelor de biliard.

Să ne ocupăm acum de detaliile interacţiei – mai exact, de punctul în care electronul şi pozitronul iniţiali se anihilează şi produc fotonul. Elementul esenţial, aşa cum va reieşi din cele ce urmează, este că există un loc exact şi un moment de timp exact, perfect identificabile, în care acest lucru se întâmplă; locul este marcat în figura 6.6.

Cum se modifică această descriere dacă, atunci când examinăm îndeaproape aceste obiecte presupuse a fi zero-dimensionale, constatăm că ele sunt corzi uni-dimensionale? Procesul fundamental de interacţie este acelaşi, dar acum obiectele care se ciocnesc sunt bucle oscilante, aşa cum se vede în figura 6.7. Dacă aceste bucle vibrează exact în modul de rezonanţă care trebuie, ele vor corespunde unui electron şi unui pozitron în curs de ciocnire, la fel ca în figura 6.6. Numai când sunt examinate la cele mai mici scări de distanţă, mult mai mici decât cele la care tehnologia actuală are acces, devin observabile

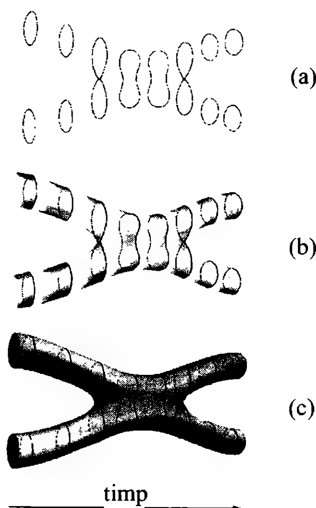


Figura 6.7 (a) Două corzi în curs de ciocnire pot fuziona într-o a treia coardă, care apoi se poate desface în alte două corzi, deplasându-se pe traiectorii deviate. (b) Acelaşi proces ca în (a), dar punând în evidenţă mişcarea corzilor. (c) O „fotografiere continuă" a celor două corzi care interacţionează, măturând o „foaie de univers".

caracteristicile lor de corzi. Ca şi în cazul particulelor punctiforme, cele două corzi se ciocnesc şi se anihilează reciproc într-o licărire. Licărirea, un foton, este ea însăşi o coardă cu un mod particular de vibrație. Prin urmare, cele două corzi incidente interacționează, contopindu-se una cu alta şi producând o a treia coardă, aşa cum arată figura 6.7. La fel ca în descrierea cu particule punctiforme, această coardă călătoreşte puțin, după care îşi eliberează energia obținută de la cele două corzi inițiale, disociindu-se în două corzi care merg mai departe. Iarăşi, din orice perspectivă, cu excepția celei la scara cea mai mică, aceste procese vor arăta la fel ca la interacțiunea dintre particulele punctiforme din figura 6.6.

Există totuşi o diferență crucială între cele două descrieri. Am evidențiat faptul că interacția particulelor punctiforme are loc într-un punct identificabil în spațiu şi timp, o poziție asupra căreia toți observatorii vor fi de acord. Aşa cum vom vedea acum, acest lucru nu este valabil în cazul interacției dintre corzi. Vom arăta acest lucru comparând modul în care George şi Gracie, cei doi observatori în mişcare

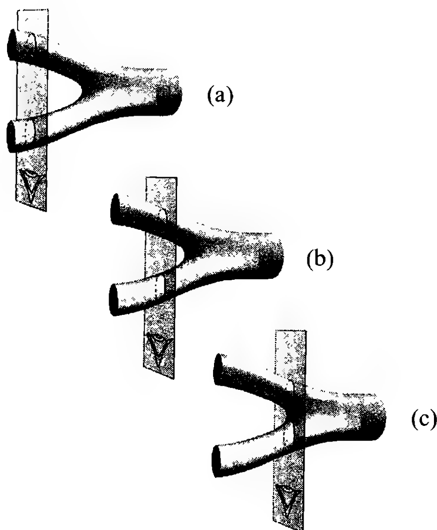


Figura 6.8 Cele două corzi incidente la trei momente succesive de timp, văzute din perspectiva lui George. În (a) şi (b) corzile se apropie; în (c) ele se ating pentru prima dată.

relativă din capitolul 2, ar descrie interacția. Vom vedea că ei nu cad de acord asupra locului şi momentului în care cele două corzi se ating pentru prima dată.

Pentru aceasta, să ne imaginăm că privim interacția dintre cele două corzi printr-un aparat de filmat a cărui diafragmă este ținută deschisă, astfel că toată istoria procesului este captată pe o singură peliculă.[49] Rezultatul – cunoscut sub numele de foaia de univers a corzii – e prezent în figura 6.7 (c). Secționând foaia de univers cu planuri paralele – aşa cum se taie o bucată de pâine în felii –, istoria interacțiunii dintre corzi poate fi înregistrată moment cu moment. Un exemplu al acestei secționări e dat în figura 6.8. Concret, figura 6.8. (a) îl prezintă pe George concentrat asupra celor două corzi incidente şi un plan ataşat, care *trece prin toate evenimentele din spațiu care au loc în acelaşi timp*, conform perspectivei lui. Aşa cum am procedat de mai multe ori în capitolele precedente, am suprimat o dimensiune spațială pentru a câştiga claritate vizuală. În realitatè, bineînțeles, este vorba de o matrice tridimensională de evenimente care au loc în acelaşi

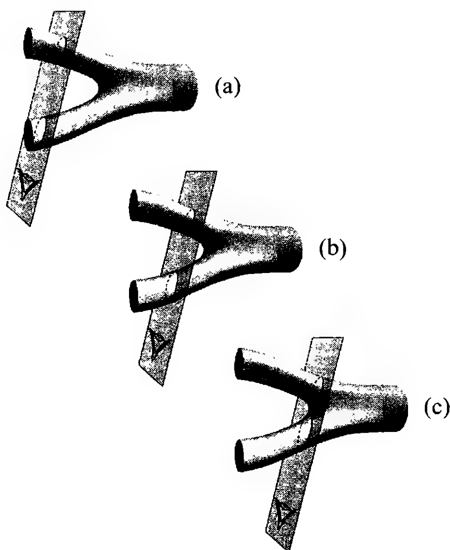


Figura 6.9 Cele două corzi incidente la trei momente succesive de timp, văzute din perspectiva lui Gracie. În (a) şi (b) corzile se apropie; în (c) ele se ating pentru prima dată.

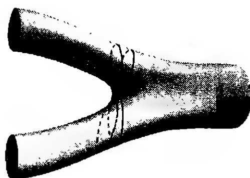


Figura 6.10 George și Gracie nu cad de acord asupra locului unde se petrece interacția.

timp, conform oricărui observator. Figurile 6.8 (b) și 6.8 (c) ne prezintă două instantanee la momente de timp ulterioare – secțiuni ulterioare ale foii de univers – arătând cum vede George cele două corzi apropiindu-se una de alta. În figura 6.8 (c) e indicat aspectul esențial: momentul de timp în care, conform lui George, cele două corzi se ating și se contopesc, producând astfel o a treia coardă.

Să facem acum același lucru pentru Gracie. Așa cum am văzut în capitolul 2, mișcarea relativă dintre George și Gracie duce la dezacordul lor în ceea ce privește evenimentele care au loc în același timp. Din perspectiva lui Gracie, evenimentele din spațiu care au loc în același timp se află într-un plan diferit, așa cum se arată în figura 6.9. Asta înseamnă, din perspectiva lui Gracie, că foaia de univers din figura 6.7 (c) trebuie secționată sub un unghi diferit pentru a pune în evidență, moment cu moment, desfășurarea interacției.

În figurile 6.9 (b) și (c) sunt prezentate momente succesive în timp, acum din perspectiva lui Gracie, inclusiv momentul în care ea vede cele două corzi incidente atingându-se și dând naștere unei a treia corzi.

Comparând figurile 6.8 (c) și 6.9 (c), așa cum facem în figura 6.10, vedem că George și Gracie nu cad de acord asupra locului și momentului de timp în care cele două corzi se ating mai întâi – unde interacționează. Fiind un obiect extins, coarda face să *nu existe un loc în spațiu și un moment de timp clar definite în care corzile interacționează prima dată* – de fapt, aceasta depinde de starea de mișcare a observatorului.

Dacă aplicăm același raționament la particulele punctiforme care interacționează, așa cum e prezentat schematic în figura 6.11, reobținem concluzia enunțată anterior – există un punct în spațiu și un moment de timp bine definite în care particulele interacționează.

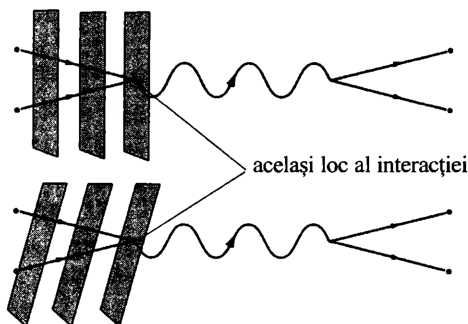


Figura 6.11 Observatori aflați în mișcare relativă sunt de acord asupra locului și momentului de timp în care două particule punctiforme interacționează.

Particulele punctiforme înmagazinează toată interacția într-un punct bine definit. Când forța implicată în interacție este forța gravitațională – adică atunci când particula mesager a forței este gravitonul, în locul fotonului – această înmagazinare totală a acțiunii forței într-un singur punct produce rezultate dezastruoase, cum ar fi rezultatele infinite la care ne-am referit mai sus. Corzile, în schimb, „netezesc" zona în care interacțiunea are loc. Deoarece observatori diferiți percep interacțiunea ca având loc în diferite poziții de-a lungul părții din stânga a suprafeței din figura 6.10, aceasta înseamnă că, în realitate, locul unde se petrece interacțiunea se întinde peste toate aceste poziții. Aceasta dispersează impactul forței și, în cazul forței gravitaționale, această dispersare diluează semnificativ proprietățile ei ultramicroscopice – atât de mult, încât calculele dau răspunsuri cuminți, finite, în locul infiniților anteriori. Aceasta este o versiune mai precisă a netezirii întâlnite în răspunsul simplist dat în secțiunea precedentă. Și, din nou, această dispersare se manifestă în netezirea agitației ultramicroscopice a spațiului, din moment ce distanțele mai mici decât lungimea Planck se estompează.

Ca și cum am vedea lumea prin ochelari care sunt fie prea slabi, fie prea puternici, detalii fine, sub dimensiunea Planck, detalii care ar fi accesibile particulelor punctiforme, sunt estompate în ansamblu de teoria corzilor și devin inofensive. Spre deosebire însă de situația în care am avea vederea proastă, dacă teoria corzilor este descrierea ultimă a universului, atunci nu mai există lentile de corecție care să

poată focaliza clar presupusele fluctuații ce ar avea loc la scară mai mică decât scara Planck. Incompatibilitatea dintre relativitatea generală și mecanica cuantică – care ar deveni manifestă numai la distanțe mai mici decât lungimea Planck – este evitată într-un univers în care există o limită inferioară a distanțelor accesibile sau, altfel spus, o limită sub care distanțele nu mai există în sens convențional. Acesta este universul descris de teoria corzilor, în care vedem că legile la scară mare și la scară mică pot fi combinate în mod armonios, iar presupusele catastrofe ce apar la scară ultramicroscopică sunt eliminate.

Dincolo de corzi?

Corzile sunt remarcabile pentru două motive. Primul este că, deși au extindere spațială, pot fi descrise în mod necontradictoriu prin mecanica cuantică. Al doilea este că între modurile lor de vibrație există unul care are exact aceleași proprietăți ca gravitonul, făcând astfel ca gravitația să fie parte intrinsecă a structurii sale. Dar așa cum teoria corzilor arată că noțiunea convențională de particulă punctiformă zero-dimensională este o idealizare matematică neîntâlnită în lumea reală, s-ar putea ca și un fir uni-dimensional, infinit de subțire, să fie iarăși o idealizare matematică? Ar putea oare să aibă grosime corzile – ca suprafața bidimensională a unei camere de bicicletă sau, chiar mai realist, ca un covrig subțire, tridimensional? Dificultățile aparent insurmontabile întâlnite de Heisenberg, Dirac și ceilalți în încercările lor de a construi o teorie cuantică a grăunțelor tridimensionale i-au împiedicat în repetate rânduri pe cercetători să urmeze acest lanț firesc de raționamente.

Deodată însă, la mijlocul anilor 1990, teoreticienii corzilor au înțeles, prin raționamente indirecte și subtile, că asemenea obiecte cu mai multe dimensiuni joacă într-adevăr un rol important și subtil chiar în teoria corzilor. Cercetătorii și-au dat seama treptat că teoria corzilor nu este o teorie care conține numai corzi. O observație crucială, esențială pentru cea de-a doua revoluție a supercorzilor inițiată de Witten și alții în 1995, este că teoria corzilor include ingrediente cu diverse dimensiuni: constituenți bidimensionali ca discurile de Frisbee, bule tridimensionale și chiar posibilități mai exotice. Aceste descoperiri

foarte recente vor fi reluate în capitolele 12 şi 13. Acum însă vom continua să urmărim evoluţia istorică şi să explorăm mai departe uimitoarele proprietăţi noi ale universului construit din corzi unidimensionale în loc de particule punctiforme zero-dimensionale.

CAPITOLUL 7

Despre „super“ în teoria supercorzilor

Când a fost confirmat succesul expediției lui Eddington din 1919, în care s-au testat prin observație astronomică predicțiile lui Einstein privind curbarea de către Soare a razelor de lumină provenite de la stele îndepărtate, fizicianul olandez Hendrick Lorentz i-a trimis lui Einstein o telegramă prin care îi aducea la cunoștință veștile bune. Când s-a răspândit vestea despre telegrama de confirmare a teoriei generale a relativității, un student l-a întrebat pe Einstein ce ar fi spus dacă experimentul lui Eddington i-ar fi infirmat teoria. Einstein i-a răspuns: „Atunci mi-ar fi părut rău pentru drăguțul de Lord, fiindcă teoria *este* corectă“.[50] Bineînțeles că, dacă într-adevăr experimentele nu ar fi confirmat predicțiile lui Einstein, teoria nu ar fi fost corectă, iar relativitatea generală nu ar fi devenit unul din pilonii fizicii moderne. De fapt, Einstein a vrut să spună că teoria generală a relativității descrie gravitația cu o eleganță atât de profundă, în idei atât de simple și totuși puternice, încât nu putea crede că natura ar fi ignorat-o. În concepția lui Einstein, teoria generală a relativității era prea frumoasă pentru a fi greșită.

Criteriile estetice nu pot însă arbitra discursul științific. În ultimă instanță, teoriile sunt cântărite după însă cât de bine se potrivesc cu rezultatele experimentale. La această remarcă trebuie făcut însă un amendament. În cursul construcției unei teorii, datorită dezvoltării ei incomplete, este dificil să cântărești în detaliu consecințele ei experimentale. Fizicienii însă trebuie să cântărească și să aleagă direcția în care dezvoltă această teorie incompletă. Unele dintre aceste decizii sunt dictate de păstrarea coerenței logice interne; trebuie desigur să pretindem de la o teorie bună să nu conțină absurdități logice. Alte decizii

sunt ghidate de implicațiile experimentale calitative ale unei construcții teoretice asupra alteia; nu vom fi interesați de o teorie care nu seamănă cu nimic din ceea ce observăm în lumea înconjurătoare. Există însă și cazuri în care într-adevăr teoreticienii au luat decizii bazate pe criterii estetice – în sensul că teoriile au o eleganță și o frumusețe a structurii pe măsura lumii în care trăim. Bineînțeles că nimic nu garantează că această abordare ne conduce către adevăr. Poate că în profunzime universul are o structură mai puțin elegantă decât ne-a făcut să credem experiența, sau poate vom descoperi că actualelor noastre criterii estetice le trebuie mai mult rafinament pentru a fi aplicate în contexte din ce în ce mai puțin familiare. În orice caz, mai ales acum când intrăm în era în care teoriile noastre descriu domenii ale universului din ce în ce mai dificil de investigat experimental, fizicienii se bazează pe asemenea criterii estetice pentru a evita potecile întunecate și drumurile fără ieșire pe care altminteri le-ar putea urmări. Până acum, această abordare s-a dovedit extrem de folositoare.

Ca și în artă, simetria constituie o parte esențială a esteticii în fizică. Dar, spre deosebire de artă, simetria în fizică are un înțeles foarte concret și precis. De fapt, dacă urmăm conștiincios această noțiune precisă de simetrie spre concluzia ei matematică, vedem că în ultimele decenii fizicienii au creat teorii în care particulele de materie și particulele mesager se întrepătrund mai strâns decât s-ar fi crezut. Asemenea teorii care unesc nu numai forțele naturii, ci și constituenții ei materiali au cea mai mare simetrie posibilă, și din acest motiv au fost numite *supersimetrice*. După cum vom vedea, teoria supercorzilor este în același timp fundamentul și culmea unui cadru supersimetric.

Natura legilor fizicii

Să ne imaginăm un univers în care legile fizicii sunt la fel de efemere ca și gusturile în materie de modă – schimbându-se de la an la an, de la săptămână la săptămână sau chiar de la o clipă la alta. Într-o asemenea lume, presupunând, bineînțeles că aceste schimbări nu influențează procesele de bază ale vieții, ar fi imposibil să te plictisești. Cea mai simplă acțiune ar fi o adevărată aventură, atât timp cât variațiile întâmplătoare nu ar mai permite nimănui să se folosească de experiența anterioară pentru a face predicții despre ce se va petrece în viitor.

Un asemenea univers ar fi coşmarul fizicienilor. Fizicienii – ca şi majoritatea oamenilor – se bazează pe stabilitatea universului: legile care erau valabile ieri sunt valabile şi azi şi îşi vor păstra valabilitatea şi în viitor (chiar dacă noi nu am fost suficient de inteligenţi pentru a le descoperi pe toate). Ce sens am mai putea da cuvântului „lege" dacă ea s-ar schimba pe neaşteptate? Asta nu înseamnă că universul este static, bineînţeles că el se transformă în diverse feluri de la un moment la altul. Înseamnă că legile care guvernează aceste evoluţii sunt fixe şi neschimbate. Acum ne-am putea întreba dacă suntem într-adevăr siguri de asta. De fapt, nu suntem. Dar succesul nostru în descrierea diverselor caracteristici ale universului, de la momentul imediat următor marii explozii şi până în zilele noastre, ne asigură că, dacă aceste legi se schimbă, schimbarea este foarte lentă. Cea mai simplă presupunere, în conformitate cu datele pe care le deţinem, este că aceste legi sunt de fapt fixe.

Să ne imaginăm acum un univers în care legile fizicii sunt la fel de diverse în spaţiu cum sunt culturile locale – schimbându-se imprevizibil de la un loc la altul şi rezistând oricărei influenţe exterioare de a se conforma. La fel ca aventurile lui Guliver, călătoriile într-o astfel de lume ne-ar oferi o gamă extrem de largă de experienţe imprevizibile. Dar, din perspectiva unui fizician, ar fi un adevărat coşmar. Este suficient de dificil, de exemplu, să trăieşti într-o lume în care legile diferă de la o ţară la alta, uneori chiar de la un stat la altul. Să ne imaginăm cum ar fi dacă înseşi legile *naturii* ar fi la fel de variate. Într-o asemenea lume, experimentele făcute într-un laborator nu şi-ar găsi corespondent în legile fizicii în vigoare în alt loc. Atunci fizicienii ar trebui să refacă toate experimentele în diversele locuri pentru a determina legile valabile local. Din fericire însă, toată ştiinţa noastră ne demonstrează că legile fizicii sunt aceleaşi pretutindeni. Experimentele din toată lumea converg spre acelaşi set de explicaţii fizice. Mai mult, posibilitatea de a explica un număr mare din observaţiile noastre astrofizice asupra unor regiuni îndepărtate ale cosmosului folosind un set fix de principii fizice ne duce spre concluzia că aceleaşi reguli sunt valabile pretutindeni. Pentru că n-am călătorit niciodată la capătul celălalt al universului, nu putem infirma cu certitudine posibilitatea ca nişte legi fizice total diferite să existe în altă parte, dar experienţa noastră neagă această presupunere.

Şi, din nou, asta nu înseamnă că universul arată la fel – sau că are exact aceleaşi proprietăţi – în zone diferite. Un astronaut poate face salturi uriaşe pe Lună şi tot felul de alte lucruri imposibil de făcut pe Pământ. Dar ştim că aceste diferenţe apar datorită faptului că Luna nu este la fel de masivă ca Pământul, nu pentru că legile gravitaţiei s-ar schimba de la un loc la celălalt. Legea gravitaţiei a lui Newton, sau mai precis a lui Einstein, este aceeaşi pe Pământ și pe Lună. Faptul că experienţa trăită de astronaut e diferită se datorează schimbărilor detaliilor mediului, şi nu variaţiei legilor fizice.

Fizicienii numesc aceste două caracteristici ale legilor fizice – faptul că nu depind de locul sau momentul în care le folosim – *simetrii* ale naturii. Prin acest termen, fizicienii vor să spună că natura tratează fiecare moment din timp şi fiecare loc din spaţiu la fel – simetric – ceea ce garantează faptul că se aplică aceleaşi legi fundamentale. Cam la fel cum influenţează arta și muzica, asemenea simetrii oferă o satisfacţie profundă; ele subliniază ordinea şi coerenţa universului. Felul elegant în care o bogăţie de fenomene complexe şi diverse apar dintr-un set simplu de legi universale este cel puţin o parte a ceea ce fizicienii înţeleg prin cuvântul „frumos".

În discuţiile noastre asupra teoriei speciale şi generale a relativităţii am găsit şi alte simetrii ale naturii. Să nu uităm că principiul relativităţii, care stă la baza relativităţii speciale, spune că toate legile fizicii trebuie să rămână neschimbate indiferent de mişcarea relativă cu viteza constantă pe care ar putea-o avea observatorii individuali. Este vorba de o simetrie, fiindcă de aici rezultă că natura tratează toţi acești observatori în mod identic – simetric. Fiecare observator este îndreptăţit să se considere în repaus. Şi, din nou, nu este vorba de faptul că observatorii în mişcare relativă vor face observaţii identice, ci, aşa cum am văzut mai sus, există o mulţime de *diferenţe* uimitoare între observaţiile lor. Asemenea experimentelor disparate în care astronautul sare pe Pământ şi pe Lună, diferenţele dintre observaţiile făcute reflectă detaliile mediului înconjurător – observatorii sunt în mişcare relativă – chiar dacă observaţiile lor sunt guvernate de *legi* identice.

Cu principiul echivalenţei din teoria generală a relativităţii, Einstein a extins mult această simetrie, arătând că, de fapt, legile fizicii sunt identice pentru toţi observatorii, chiar dacă aceştia sunt supuşi unor complicate mişcări accelerate. Să nu uităm că Einstein a ajuns aici înţelegând că un observator în mişcare accelerată este îndreptăţit să se

considere în repaus şi să afirme că forţa pe care o resimte se datorează unui câmp gravitaţional. Odată cu includerea gravitaţiei, toate punctele de vedere observaţionale se află pe picior de egalitate. Dincolo de atracția estetică intrinsecă a acestui tip de tratare egalitară a tuturor mişcărilor, am văzut că aceste principii de simetrie au o importanță decisivă pentru uimitoarele concluzii ale lui Einstein privind gravitația.

Mai există oare şi alte principii de simetrie legate de spaţiu, timp şi mişcare pe care le respectă legile naturii? Dacă ne gândim bine s-ar putea să mai existe o posibilitate. Legile fizicii nu ar trebui să depindă de *unghiul* din care faci observaţiile. De exemplu, dacă după ce ai efectuat un experiment vrei să roteşti tot echipamentul de lucru şi să refaci experimentul, aceleaşi legi ar trebui să se aplice. Aceasta se numeşte simetrie la rotaţie şi ne spune că legile fizicii tratează toate *orientările* posibile în mod egal. Este un principiu de simetrie la fel de important ca şi cele prezentate anterior.

Mai există oare şi altele? Am scăpat din vedere vreo simetrie? Am putea să ne gândim la simetriile de etalonare asociate forţelor negravitaţionale, prezentate în capitolul 5. Sunt într-adevăr simetrii ale naturii, dar de un tip mai abstract, noi concentrându-ne acum asupra celor care au o legătură directă cu spaţiul, timpul sau mişcarea. Cu această prezentare, probabil că nu ne mai vin în minte alte posibilităţi. De fapt, fizicienii Sidney Coleman şi Jeffrey Mandula au demonstrat în 1967 că nici o altă simetrie asociată spaţiului, timpului sau mişcării nu mai poate fi combinată cu cele discutate până acum pentru a obţine o teorie care să descrie o lume cât de cât asemănătoare cu cea în care trăim.

Ulterior însă, examinarea mai atentă a acestei teoreme pornind de la observaţiile câtorva fizicieni a dezvăluit existenţa unei lacune: rezultatul Coleman-Madula nu a exploatat la maximum simetriile legate de ceva numit *spin*.

Spinul

O particulă elementară, aşa cum este electronul, se poate roti în jurul unui nucleu atomic oarecum în acelaşi fel în care Pământul se roteşte în jurul Soarelui. Dar, în tratarea tradiţională a electronului ca particulă punctiformă, s-ar părea că nu mai poate exista un analog al rotaţiei Pământului în jurul propriei axe. La rotaţia oricărui obiect, punctele

de pe axa lui de rotaţie nu se mişcă – asemeni *punctului central* al unui disc care se învârte. Dacă ceva e cu adevărat punctiform, atunci nu mai există „alte puncte“ care să nu se afle pe axa de rotaţie. Astfel, s-ar părea că nu se poate vorbi despre rotaţia proprie a unui obiect punctiform. Cu mulţi ani în urmă, un asemenea raţionament a fost subiectul unei alte surprize a mecanicii cuantice.

În 1925, fizicienii olandezi George Uhlenbeck şi Samuel Goudsmit şi-au dat seama că un mare număr de date experimentale deconcertante privind proprietăţile luminii absorbite şi emise de atomi puteau fi explicate dacă presupunem că atomul are anumite proprietăţi *magnetice*. Cu câteva sute de ani în urmă, francezul André-Marie Ampère demonstrase că magnetismul apare din mişcarea sarcinii electrice. Uhlenbeck şi Goudsmit au continuat pe acelaşi drum şi au descoperit că doar un anume tip al mişcării electronului poate da naştere proprietăţilor magnetice sugerate de datele experimentale: mişcarea de *rotaţie în jurul propriei axe* – adică *spinul*. Contrar aşteptărilor clasiciste, Uhlenbeck şi Goudsmit au declarat că, asemănător Pământului, electronii au mişcare de revoluţie *şi* mişcare de rotaţie proprie.

Oare Uhlenbeck şi Goudsmit au vrut într-adevăr să spună că electronul se roteşte în jurul axei sale? Şi da, şi nu. Studiile lor au demonstrat că există o noţiune cuantică de rotaţie proprie, asemănătoare oarecum cu rotaţia obişnuită, dar de o natură intrinsec cuantică. Este vorba despre una dintre acele proprietăţi ale lumii microscopice care desfide ideile clasice, dar reprezintă o trăsătură cuantică verificată experimental. De exemplu, să ne imaginăm un patinator care face piruete. Când îşi strânge braţele pe lângă corp, se învârte mai repede, când şi le întinde, se învârte mai încet. Mai devreme sau mai târziu, în funcţie de avântul luat iniţial, se va roti din ce în ce mai încet până se va opri. Nu acelaşi lucru se întâmplă în cazul rotaţiei descoperite de Uhlenbeck şi Goudsmit. Conform cercetărilor şi articolelor publicate apoi de ei, orice electron din univers, dintotdeauna şi pentru totdeauna are *o rotaţie proprie într-un ritm fix, neschimbător.* Rotaţia unui electron nu este o stare de mişcare tranzitorie, ca în cazul obiectelor obişnuite, care se rotesc dintr-un motiv sau altul. Rotaţia unui electron este o proprietate *intrinsecă*, asemeni masei sau sarcinii sale electrice. Dacă electronul nu s-ar roti, atunci nu ar mai fi un electron.

Deşi primele experimente s-au concentrat asupra electronului, fizicienii au arătat apoi că ideea de spin se aplică la toate particulele

de materie care compun cele trei familii din tabelul 1.1. Această afirmaţie este adevărată până în cel mai mic detaliu: *toate* particulele de materie (şi de asemenea partenerii lor de antimaterie) au spinul egal cu cel al electronului. În limbaj de specialitate, fizicienii spun că particulele de materie au „spin ½,“, unde valoarea ½ reprezintă grosso modo o măsură cuantică a vitezei de rotaţie proprie a particulelor.[51] În plus, fizicienii au demonstrat că particulele care transmit forţele negravitaţionale – fotonii, bosonii de etalonare slabi şi gluonii – au o rotaţie proprie caracteristică *de două ori* mai mare decât aceea a particulelor de materie. Ei au cu toţii „spin 1.“

Ce putem spune însă despre gravitaţie? Încă înainte de teoria corzilor, fizicienii au putut determina spinul ipoteticului graviton, particula care ar transmite forţa gravitaţională. Răspunsul a fost: de două ori valoarea spinului fotonilor, bosonilor de etalonare slabi şi gluonilor – adică, „spin 2“.

În contextul teoriei corzilor, spinul – la fel ca masa şi sarcinile de forţă – este asociat cu modul de vibraţie executat de coardă. Ca şi în cazul particulelor punctiforme, este puţin derutant să ne gândim că spinul unei corzi provine de la rotirea efectivă a corzii în spaţiu; imaginea aceasta oferă însă o descriere simplificată pe care o putem ţine minte. Ajunşi în acest punct, putem lămuri o problemă importantă întâlnită anterior. În 1974, Scherk şi Schwartz au declarat că teoria corzilor trebuie gândită ca o teorie cuantică ce include şi forţa gravitaţională, deoarece ei descoperiseră că în repertoriul corzilor apare *în mod obligatoriu* un mod de vibraţie *fără masă şi cu spin 2* – caracteristicile distinctive ale gravitonului. Şi unde există un graviton există şi gravitaţie.

Cu aceste cunoştinţe de bază despre spin, să ne întoarcem la rolul pe care acesta îl joacă în dezvăluirea lacunei din rezultatul Coleman-Madula privind posibilele simetrii ale naturii, menţionate în secţiunea precedentă.

Supersimetriile şi superpartenerii

Aşa cum am subliniat, conceptul de spin, deşi la prima vedere poate fi asociat cu imaginea unui titirez în rotaţie, diferă de acesta într-un mod fundamental ce îşi are rădăcinile în mecanica cuantică. Desco-

perirea sa în 1925 a dezvăluit că există un alt tip de mişcare de rotaţie, imposibilă într-un univers pur clasic.

Acest fapt sugerează următoarea întrebare: aşa cum mişcarea de rotaţie obişnuită ne conduce la principiul de simetrie al invariaţiei la rotaţie („fizica tratează toate orientările spaţiale în acelaşi fel”), este oare posibil ca mişcarea de rotaţie mai subtilă asociată cu spinul să ducă la o altă simetrie a legilor naturii? În 1971, fizicienii au reuşit să răspundă afirmativ la această întrebare. Întreaga poveste este destul de complicată, însă ideea de bază este că atunci când luăm în considerare spinul mai există exact *o simetrie a legilor naturii* matematic posibilă. Ea este cunoscută sub numele de *supersimetrie*.[52]

Supersimetria nu poate fi asociată cu o schimbare simplă şi intuitivă a perspectivei din care facem observaţiile; schimbările în timp, poziţie spaţială, orientare unghiulară şi viteză de mişcare epuizează aceste posibilităţi. Dar aşa cum spinul este „ca o mişcare de rotaţie proprie, din perspectivă cuantică“, supersimetria poate fi asociată cu o schimbare a punctului de observaţie într-o „extensie cuantică a spaţiului şi timpului“. Ghilimelele sunt importante aici, pentru că ultima afirmaţie este menită doar să dea o idee aproximativă despre includerea supersimetriei în cadrul mai larg al principiilor de simetrie.[53] Deşi înţelegerea originii supersimetriei este destul de subtilă, ne vom concentra asupra uneia dintre *implicaţiile* ei importante – admiţând că natura încorporează principiile supersimetriei – care este mult mai uşor de înţeles.

La începutul anilor 1970, fizicienii şi-au dat seama că, dacă universul este supersimetric, particulele din natură trebuie să existe în *perechi* ai căror spini diferă printr-o jumătate de unitate. Astfel de perechi de particule – indiferent dacă le considerăm punctiforme (ca în modelul standard) sau ca bucle vibrante minuscule – sunt numite *superparteneri*. Cum particulele de materie au spinul 1/2, în timp ce unele dintre particulele mesager au spinul 1, supersimetria apare ca rezultatul împerecherii – parteneriatului – dintre particulele de materie şi particulele de forţă. Din această perspectivă ea apare ca un minunat concept unificator. Dificultăţile încep când intrăm în detalii.

Pe la mijlocul anilor 1970, când fizicienii s-au gândit să încorporeze supersimetria în modelul standard, au descoperit că *nici unele* dintre particulele cunoscute – cele din tabelele 1.1 şi 1.2 – nu îşi pot fi superparteneri unele altora. În schimb, analize teoretice detaliate

au arătat că, dacă universul încorporează supersimetria, atunci fiecare particulă cunoscută trebuie să aibă o particulă superpartener încă nedescoperită, al cărei spin este cu jumătate de unitate mai mic decât cel al partenerului cunoscut. De exemplu, ar trebui să existe un partener de spin 0 al electronului; această particulă ipotetică a fost numită *selectron* (o prescurtare pentru electron supersimetric). Același lucru ar trebui să fie valabil și pentru celelalte particule de materie, între care, de exemplu, superpartenerii ipotetici, de spin 0, ai neutrinului și cuarcului ar fi numiți *sneutrini* și *scuarci*. În mod similar, particulele de forță ar trebui să aibă superparteneri cu spin 1/2. Pentru fotoni ar trebui să existe *fotini*, pentru gluoni, *gluini*, pentru bosonii W și Z ar fi *wini* și *zini*.

O privire mai atentă ne dezvăluie faptul că supersimetria este o caracteristică teribil de neeconomică; necesită o hoardă de particule suplimentare și ajungem în felul acesta să dublăm lista ingredienților fundamentali. Cum nici una dintre particulele superpartener nu a fost vreodată detectată, suntem îndreptățiți să reluăm remarca lui Rabi din capitolul 1 că „nimeni nu a comandat supersimetria“, iar apoi să respingem fără ezitare acest principiu de simetrie. Există totuși trei motive pentru care fizicienii consideră că renunțarea la supersimetrie ar fi prematură. Să vedem despre ce e vorba.

Pledoarie în favoarea supersimetriei: înainte de teoria corzilor

În primul rând, din punct de vedere estetic, fizicienilor le e greu să creadă că natura respectă majoritatea, dar nu toate simetriile posibile din punct de vedere matematic. Bineînțeles că e posibil ca într-adevăr simetria să fie folosită de natură în mod incomplet, dar ar fi păcat. Ar fi ca și cum Bach, după ce a dezvoltat mai multe voci care se împletesc pentru a completa un model ingenios de simetrie muzicală, ar lăsa nescrisă măsura finală care desăvârșește armonia.

În al doilea rând, chiar și pentru modelul standard, teorie care ignoră gravitația, problemele tehnice complicate asociate proceselor cuantice sunt rezolvate cu ușurință dacă teoria este supersimetrică. Problema principală este că fiecare specie distinctă de particule își

aduce contribuția la frenezia cuantică microscopică. Fizicienii au descoperit că în această mare frenetică anumite procese ce implică interacțiile particulelor rămân neproblematice *numai* dacă unele constante numerice ale modelului standard sunt alese cu mare grijă – cu o precizie mai bună decât o parte dintr-un milion de miliarde – pentru a putea anula cele mai dăunătoare efecte cuantice. O asemenea precizie ar fi necesară de exemplu la reglarea unghiului, dacă ar trebui să tragem cu o pușcă foarte puternică de pe Pământ pentru a nimeri o țintă de dimensiunea unei amoebe aflată pe Lună. Deși asemenea ajustări numerice pot fi făcute în cadrul modelului standard, mulți fizicieni privesc cu neîncredere o teorie atât de delicat construită, încât se poate prăbuși dacă la unul din numerele de care depinde se modifică a cincisprezecea cifră după virgulă.[54]

Supersimetria aduce o schimbare radicală pentru că *bosonii* – particule al căror spin este un număr întreg (numite după fizicianul indian Satyendra Bose) – și *fermionii* – particule al căror spin este jumătatea unui număr întreg impar (numite după fizicianul italian Enrico Fermi) – tind să aibă contribuții cuantice care se anulează reciproc. Asemeni capetelor opuse ale unui balansoar, când agitația cuantică a unui boson este pozitivă, cea a fermionului tinde să fie negativă, și invers. Cum supersimetria ne asigură că bosonii și fermionii apar în perechi, anulări substanțiale apar de la bun început, anulări ce reduc semnificativ o parte din frenezia efectelor cuantice. Se dovedește că soliditatea *modelului standard supersimetric* – modelul standard îmbogățit cu toate particulele superpartener – nu se mai bazează pe ajustări numerice incomod de fine ale modelului standard obișnuit. Deși acesta e un aspect foarte tehnic, mulți specialiști în fizica particulelor găsesc că supersimetria e atrăgătoare tocmai datorită acestei perspective.

A treia dovadă în favoarea supersimetriei provine din ideea *marii unificări*. Una dintre caracteristicile uimitoare ale celor patru forțe ale naturii este domeniul uriaș al intensităților lor intrinseci. Forța electromagnetică are mai puțin de 1% din intensitatea forței tari, forța slabă este de aproximativ o mie de ori mai slabă decât aceasta, iar forța gravitațională este cam încă de o sută de milioane de miliarde de miliarde de miliarde de ori mai slabă (10^{-35}). Continuând metoda inovatoare și încununată cu premiul Nobel a lui Glashow, Salam și Weinberg, care au descoperit legătura profundă între forțele electromagnetice și cele slabe (problemă discutată în capitolul 5), în anul 1974,

Glashow și colegul său de la Harvard Howard Georgi au sugerat faptul că o legătură similară ar putea fi făcută și cu forța tare. Lucrarea lor, care punea în discuție „marea unificare“ a trei din cele patru forțe, avea un punct esențial diferit față de teoria electroslabă: în vreme ce forțele electromagnetice și cele slabe s-au cristalizat dintr-o forță unificată mai simetrică atunci când temperatura universului a scăzut la aproximativ un milion de miliarde de grade deasupra lui zero absolut (10^{15}Kelvin), Georgi și Glashow au arătat că unirea cu forța tare ar deveni vizibilă doar la o temperatură cam de zece mii de miliarde de ori mai mare – aproximativ zece miliarde de miliarde de miliarde de grade deasupra lui zero absolut (10^{28}Kelvin). Din punct de vedere energetic, aceasta este cam de un milion de miliarde de ori mai mare decât masa protonului sau aproximativ patru ordine de mărime sub masa Planck. Georgi și Glashow au mutat fizica teoretică într-un domeniu al energiilor cu multe ordine de mărime peste ceea ce oamenii îndrăzniseră să exploreze până atunci.

Activitatea desfășurată ulterior la Harvard de Georgi, Helen Quinn și Weinberg a evidențiat în 1974 și mai mult potențiala unificare a forțelor negravitaționale în cadrul formalismului marii unificări. Cum contribuția lor continuă să joace un rol important în unificarea forțelor și în evaluarea relevanței supersimetriei în natură, e cazul să ne oprim puțin asupra ei.

Știm cu toții că atracția electrică dintre două particule încărcate diferit sau atracția gravitațională dintre două corpuri masive crește odată cu scăderea distanței dintre obiecte. Acestea sunt caracteristicile simple și binecunoscute ale fizicii clasice. Când studiem însă efectul pe care îl are fizica cuantică asupra tăriei forțelor, avem o surpriză. De ce e necesar ca mecanica cuantică să aibă un efect? Din nou, răspunsul ține de fluctuațiile cuantice. De exemplu, când examinăm câmpul de forță electrică al unui electron, de fapt îl observăm printr-o „ceață“ de erupții și anihilări momentane de particule și antiparticule care apar în regiunea spațială din jurul electronului. Cu ceva timp în urmă, fizicienii au observat că această ceață de fluctuații microscopice maschează adevărata tărie a câmpului de forță al electronului, la fel cum o ceață fină ascunde parțial lumina unui far. Dar, pe măsură ce ne apropiem de electron, pătrundem din ce în ce mai adânc în învelișul cețos format din particule-antiparticule, deci efectul lui diminuant scade.

Asta înseamnă că tăria câmpului electric al electronului *crește* pe măsură ce ne apropiem de el.

Fizicenii fac o diferențiere între această creștere cuantică a forței la apropierea noastră de electron și cea cunoscută în fizica clasică, spunând că tăria *intrinsecă* a forței electromagnetice crește în domeniul distanțelor mici. Acest lucru reflectă faptul că intensitatea crește nu doar pentru că ne aflăm mai aproape de electron, ci și pentru că o parte mai mare a câmpului electric intrinsec al electronului devine vizibilă. De fapt, deși ne-am concentrat asupra electronului, această discuție este valabilă pentru toate particulele încărcate electric și putem spune că efectele cuantice fac ca tăria forței electromagnetice să crească atunci când o examinăm la o scară mai mică a distanțelor.

Ce am putea spune despre celelalte forțe din modelul standard? Cum variază cu distanța tăria lor intrinsecă? În 1973, Gross și Frank Wilczek, la Princeton, și, în mod independent, David Politzer, la Harvard, au studiat această problemă și au obținut un rezultat surprinzător: norul cuantic al erupțiilor și anihilărilor particulă-antiparticulă *amplifică* tăria forțelor slabe și a forțelor tari. Aceasta înseamnă că atunci când le examinăm la distanțe din ce în ce mai mici, străpungem din ce în ce mai mult norul care ne induce în eroare, deci simțim din ce în ce mai puțin amplificarea lui. Prin urmare, tăria acestor forțe *scade* atunci când le examinăm mai îndeaproape.

Georgi, Quinn și Weinberg au dus acest rezultat la o concluzie remarcabilă. Ei au demonstrat că atunci când toate aceste efecte ale frenezieі cuantice sunt luate în considerare, rezultatul net este că intensitățile acestor trei forțe negravitaționale se *apropie*. Deși aceste intensități sunt foarte diferite la scările de dimensiuni accesibile prin actuala tehnologie, Georgi, Quinn și Weinberg au arătat că aceste diferențe se datorează de fapt efectului diferit pe care ceața activității cuantice microscopice îl are asupra fiecărei forțe. Calculele lor au demonstrat că dacă pătrundem prin această ceață și examinăm acțiunea forțelor nu la scara distanțelor obișnuite, ci la distanțe de aproximativ o sutime de miliardime de miliardime de miliardime (10^{-29}) de centimetru (de doar zece mii de ori mai mare decât lungimea Planck), atunci intensitățile celor trei forțe negravitaționale ne apar ca fiind egale.

Deși departe de domeniul experienței cotidiene, energia înaltă necesară pentru distanțe atât de mici era caracteristică universului fierbinte în vârstă de numai o miime de miliardime de miliardime

de miliardime de miliardime de secundă (10^{-39}) – când temperatura sa era de ordinul a 10^{28} Kelvin, cum am menționat mai devreme. Oarecum asemănător felului în care o mulțime de ingrediente disparate – bucăți de metal, lemn, piatră, minerale etc. – se topesc și devin o plasmă uniformă și omogenă când sunt încălzite la temperaturi suficient de ridicate, aceste lucrări teoretice au arătat că și forțele slabe, tari și electromagnetice se contopesc într-o singură mare forță la asemenea temperaturi imense. Acest fapt este ilustrat în figura 7.1.[55]

Cu toate că nu dispunem de tehnologia necesară pentru a sonda distanțe atât de mici sau pentru a produce asemenea temperaturi uriașe, din 1974 și până în prezent experimentatorii și-au îmbunătățit mult tehnicile de măsurare a intensității celor trei forțe negravitaționale. Aceste date, punctele de start ale celor trei curbe ale tăriei forțelor din figura 7.1, constituie datele de intrare ale extrapolărilor cuantice făcute de Georgi, Quinn și Weinberg. În 1991, Ugo Amaldi de la CERN, Wim de Boer și Hermann Fürstenau de la Universitatea din Karlsruhe, Germania, au recalculat extrapolările făcute de Georgi, Quinn și Weinberg folosind aceste noi rezultate experimentale și au arătat două lucruri semnificative. În primul rând, tăria celor trei forțe negravitaționale este *aproape aceeași, dar nu exact aceeași*, la scări de distanțe foarte mici (sau, echivalent, la energii mari/temperaturi mari), așa cum se vede în figura 7.2. În al doilea rând, această discre-

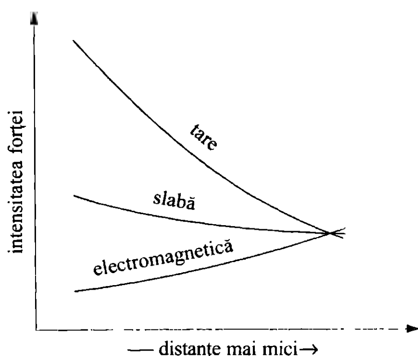


Figura 7.1. Intensitatea celor trei forțe negravitaționale, așa cum operează ele la distanțe din ce în ce mai mici – sau, echivalent, așa cum acționează în procese la energii din ce în ce mai mari.

panță minusculă, dar de necontestat, a tăriei lor *dispare* dacă e încorporată supersimetria. Motivul este acela că noile particule superpartener impuse de supersimetrie aduc o contribuție suplimentară la fluctuațiile cuantice, iar aceste fluctuații sunt exact cele necesare pentru a face ca intensitățile forțelor să conveargă.

Pentru mulți fizicieni pare foarte greu de crezut că natura ar alege forțe care au intensități ce se unifică microscopic – adică devin egale – *aproape,* dar nu exact. Este ca și cum am avea un puzzle în care ultima piesă are o formă puțin greșită și nu se potrivește perfect în golul rămas. Supersimetria rectifică prompt această nepotrivire, așa încât toate piesele se îmbină cu precizie.

Un alt aspect al acestei perspective este că oferă un posibil răspuns la întrebarea: de ce nu am descoperit nici una din particulele superpartener? Calculele care au dus la convergența tăriei forțelor, împreună cu alte studii făcute de mai mulți fizicieni, indică faptul că particulele superpartener trebuie să fie mult mai grele decât particulele cunoscute. Deși nu pot fi făcute predicții precise, studiile arată că particulele superpartener ar putea fi de o mie de ori mai masive decât un proton, dacă nu și mai grele. Cum nici măcar cele mai puternice acceleratoare din ziua de azi nu pot atinge asemenea energii, s-ar putea găsi aici explicația faptului că aceste particule nu au fost încă descoperite. În

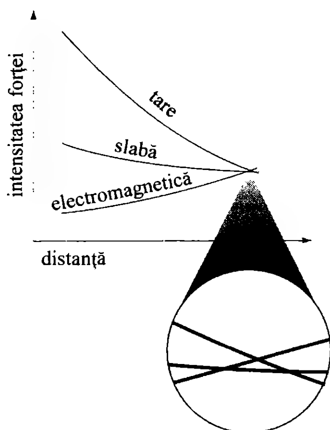


Figura 7.2. O îmbunătățire a calculelor pentru intensitățile forțelor arată că, fără supersimetrie, ele se apropie, dar nu se întâlnesc exact.

capitolul 9 vom reveni cu o analiză a perspectivelor experimentale de a determina, în viitorul apropiat, dacă supersimetria este într-adevăr o proprietate a lumii în care trăim.

Bineînțeles că motivele pentru care am ajuns să credem în existența supersimetriei – sau cel puțin să nu o negăm din start – sunt departe de a fi de necombătut. Am văzut că supersimetria rafinează teoriile până la cea mai simetrică formă, dar ați putea spune că universului nu-i pasă de cea mai simetrică formă la care se poate ajunge din punct de vedere matematic. Am subliniat deja un aspect important din punct de vedere tehnic, și anume că supersimetria ne scutește de obligația de a ajusta parametrii numerici ai modelului standard pentru a evita probleme cuantice subtile – dar ați putea susține că nu e exclus ca adevărata teorie care descrie natura să treacă granița fină între coerența cu sine însăși și autodistrugere. Am vorbit despre modul în care supersimetria modifică tăria intrinsecă a celor trei forțe negravitaționale pentru distanțe minuscule, așa încât acestea să se contopească într-o mare forță unificatoare, dar ați putea din nou obiecta că nimic din planurile naturii nu impune existența unei potriviri exacte a tăriilor acestor forțe la scară microscopică. Și, în sfârșit, ați putea sugera că o explicație mai simplă a faptului că particulele superpartener nu au fost niciodată găsite este chiar aceea că universul nostru nu e supersimetric, și deci particulele superpartener nu există.

Nimeni nu poate respinge vreunul din aceste răspunsuri. Dar pledoaria în favoarea supersimetriei e puternic susținută dacă luăm în considerare rolul ei în teoria corzilor.

Supersimetria în teoria corzilor

La începuturile ei, în lucrările lui Veneziano de la sfârșitul anilor 1960, teoria corzilor încorpora toate simetriile prezentate la începutul acestui capitol, dar nu încorpora supersimetria (care nu fusese încă descoperită). Această primă teorie bazată pe noțiunea de coardă era numită mai precis *teoria corzilor bosonice*. Numele *bosonic* indică faptul că toate modurile de vibrație ale unei corzi bosonice au pentru valoarea spinului un număr întreg – nu există moduri fermionice, adică nu există moduri de vibrație cu spin care să difere de un număr întreg cu o jumătate de unitate. Astfel au apărut două probleme.

Mai întâi, dacă teoria corzilor urma să descrie toate forțele și toată materia, ar fi trebuit ca ea să încorporeze cumva și modurile de vibrație fermionice, datorită faptului că particulele de materie cunoscute au toate spinul ½. Apoi a urmat descoperirea mult mai tulburătoare a faptului că există un mod de vibrație în teoria bosonică a corzilor a cărui masă (mai precis pătratul masei) era *negativă* – așa-numitul *tahion*. Încă înainte de teoria corzilor, fizicienii au studiat posibilitatea ca lumea noastră să conțină particule tahioni, în plus față de cunoscutele particule care au toate mase pozitive, dar cercetările lor au demonstrat că o asemenea teorie este dificil, dacă nu imposibil să fie logic consecventă. În mod similar, în contextul teoriei bosonice a corzilor, fizicienii au încercat tot felul de artificii pentru a explica ciudata apariție a modului de vibrație a tahionului, fără să obțină însă nici un rezultat. Toate acestea au făcut să devină din ce în ce mai limpede că, deși era interesantă, teoriei bosonice a corzilor îi lipsea un element esențial.

În 1971, Pierre Ramond de la Universitatea din Florida s-a încumetat să modifice teoria bosonică a corzilor pentru a include și modurile de vibrație fermionice. Prin lucrările sale și rezultatele ulterioare ale lui Schwarz și André Neveu, a început să se contureze o nouă versiune a teoriei corzilor. Și, spre surpriza tuturor, modurile de vibrație bosonice și fermionice ale acestei noi teorii păreau să fie împerecheate. Pentru fiecare mod bosonic exista un mod fermionic, și invers. Până în 1977, lucrările lui Ferdinando Gliozzi de la Universitatea din Torino, ale lui Scherk și David Olive, de la Imperial College, au lămurit această împerechere. Noua teorie a corzilor includea supersimetria, iar împerecherea modurilor de vibrație bosonice și fermionice reflecta acest caracter de înaltă simetrie. Teoria supersimetrică a corzilor – adică teoria supercorzilor – luase ființă. În plus, lucrările lui Gliozzi, Scherk și Olive aduceau și un alt rezultat crucial: ele arătau că nedoritele vibrații tahionice ale corzii bosonice nu afectează supercoarda. Încet, încet, piesele puzzle-ului ce constituiau teoria corzilor se așezau la locul lor.

De fapt, impactul inițial major al lucrărilor lui Ramond, Neveu și Schwarz nu a vizat teoria corzilor. În 1973, fizicienii Julius Wess și Bruno Zumino și-au dat seama că supersimetria – noua simetrie care a apărut din reformularea teoriei corzilor – era aplicabilă chiar și în teoriile bazate pe particule punctiforme. Ei au făcut pași mari spre încorporarea supersimetriei în cadrul teoriei cuantice de câmp

a particulelor punctiforme. Şi cum, la vremea aceea, teoria cuantică de câmp era domeniul principal în fizica particulelor – teoria corzilor devenind un subiect marginal –, lucrările lui Wess şi Zumino au declanşat un număr imens de cercetări asupra a ceea ce avea să se numească *teoria cuantică de câmp supersimetrică*. Modelul standard supersimetric, prezentat în secţiunea precedentă, este una dintre realizările teoretice care au încununat aceste cercetări; vedem acum că, prin jocul capricios al istoriei, chiar şi această teorie a particulelor punctiforme datorează mult teoriei corzilor.

Odată cu resuscitarea teoriei supercorzilor, pe la mijlocul anilor 1980, supersimetria a reapărut în contextul ei iniţial. Şi, în acest cadru, argumentele noastre în favoarea supersimetriei merg mult mai departe decât au mers în secţiunea precedentă. Teoria corzilor este singura modalitate cunoscută de a unifica teoria generală a relativităţii şi mecanica cuantică. Dar numai versiunea supersimetrică a teoriei corzilor evită stânjenitoarea problemă a tahionilor şi include modurile de vibraţie ale fermionilor, care pot explica particulele de materie ce alcătuiesc lumea din jurul nostru. Supersimetria este deci în acord perfect cu propunerea teoriei corzilor de a formula o teorie cuantică a gravitaţiei şi de a unifica toate forţele şi toată materia. Dacă teoria corzilor este corectă, atunci fizicienii se aşteaptă ca şi supersimetria să fie corectă.

Totuşi, până pe la mijlocul anilor 1990, un aspect deosebit de supărător a stigmatizat teoria supersimetrică a corzilor.

O bogăţie care te super-încurcă

Dacă cineva îţi spune că a rezolvat misterul soartei Ameliei Earhart*, s-ar putea să fii sceptic la început, dar dacă îţi oferă o explicaţie bine documentată şi argumentată s-ar putea să-l asculţi şi, cine ştie, să fii chiar convins. Dar ce se întâmplă dacă, în momentul următor, ţi se spune că există şi o a doua explicaţie? Asculţi răbdător şi constaţi cu surprindere că şi explicaţia alternativă este la fel de întemeiată ca prima. Şi după prezentarea celei de-a doua, ţi se oferă a treia, a patra

* Amelia Earhart a fost prima femeie pilot care a traversat Oceanul Atlantic. În 1937 a dispărut în condiţii misterioase în timp ce efectua un zbor deasupra Oceanului Pacific, iar astfel s-au născut o sumedenie de speculaţii. (*N. red.*)

şi chiar a cincea explicaţie – fiecare diferită de cealaltă, dar la fel de convingătoare. Bineînţeles că la capătul acestei experienţe nu te vei simţi mai informat asupra soartei reale a Ameliei Earhart decât la început. În domeniul explicaţiilor fundamentale, mai mult înseamnă mai puţin.

Prin 1985, teoria corzilor – nerăspunzând entuziasmului justificat cu care fusese privită – începuse să semene cu un expert mult prea zelos al cazului Earhart. Motivul este că în 1985 fizicienii reuşiseră să încorporeze supersimetria, până atunci considerată un element central al structurii teoriei corzilor, nu într-unul, ci în *cinci* feluri diferite. Fiecare metodă ducea la o împerechere a modurilor de vibraţie bosonice şi fermionice, dar detaliile acestor împerecheri, ca şi numeroasele proprietăţi ale teoriilor ce rezultau, erau diferite. Chiar dacă nu au prea mare importanţă, să amintim numele acestor cinci teorii supersimetrice ale corzilor: *Teoria de tip I, Teoria de tip IIA, Teoria de tip IIB*, *Teoria de tip Heterotic O(32)* (pronunţată „Oh-thirty-two”) şi *Teoria de tip heterotic* $E_8 \times E_8$ (pronunţată „e-eight times e-eight”). Toate caracteristicile teoriei corzilor prezentate până acum sunt valabile pentru fiecare dintre aceste teorii, ele diferind doar în detalii.

A avea cinci versiuni diferite pentru ceea ce trebuia să fie T.O.E. (teoria despre tot) – teoria unificată ultimă – era destul de stânjenitor pentru fizicienii care lucrau la teoria corzilor. Aşa cum există doar o singură explicaţie reală privind soarta Ameliei Earhart (indiferent dacă noi o vom găsi vreodată sau nu), ne aşteptăm ca acelaşi gen de raţionament să fie valabil şi în cazul celei mai profunde înţelegeri a modului în care universul funcţionează. Trăim într-un singur univers şi vrem o singură explicaţie.

O sugestie pentru rezolvarea acestei probleme ar putea fi experimentul, care le va înlătura pe celelalte patru teorii, lăsând un singur cadru explicativ relevant şi adevărat. Dar chiar dacă aşa stau lucrurile, rămâne întrebarea supărătoare: de ce există totuşi aceste teorii? Adică, după cum spunea Witten: „Dacă una dintre cele cinci teorii descrie universul nostru, atunci cine locuieşte în celelalte patru?“[56] Fizicienii visează ca descoperirea răspunsurilor absolute să ducă la o concluzie unică şi inevitabilă. În mod ideal, teoria ultimă – teoria corzilor sau o alta – ar trebui să fie aşa cum este pentru că pur şi simplu nu există altă posibilitate. Dacă am descoperi existenţa unei singure teorii perfect logice care să încorporeze ingredientele de bază ale relativităţii şi mecanicii cuantice, am şti că am ajuns la cea mai profundă înţelegere

a motivului pentru care universul are proprietăţile pe care le are. Pe scurt, ar fi paradisul teoriei unificate.[57]

Aşa cum vom vedea în capitolul 12, descoperiri recente au adus teoria corzilor cu mult mai aproape de această utopie unificatoare, arătând că cele cinci teorii diferite sunt de fapt cinci moduri de a descrie *una și aceeași teorie atotcuprinzătoare*. Teoria corzilor are înscrisă în codul ei genetic unicitatea.

Se pare că lucrurile încep să se potrivească, dar, aşa cum vom vedea în următorul capitol, unificarea cu ajutorul teoriei corzilor mai necesită încă o îndepărtare semnificativă de gândirea convențională.

CAPITOLUL 8

Mai multe dimensiuni decât putem vedea

Prin teoria specială şi teoria generală a relativităţii, Einstein a rezolvat două dintre conflictele ştiinţifice majore din ultimul secol. Deşi problemele de la care au pornit nu prevesteau asemenea rezultate, ambele teorii au transformat complet perspectiva noastră asupra spaţiului şi timpului. Teoria corzilor rezolvă cel de-al treilea conflict ştiinţific major al ultimului secol şi, într-o manieră pe care chiar şi Einstein ar fi considerat-o remarcabilă, necesită o altă revizuire radicală a concepţiilor noastre asupra spaţiului şi timpului. Teoria corzilor zguduie însă atât de puternic fundamentele fizicii moderne, încât până şi banalul şi general acceptatul număr de dimensiuni spaţiale ale universului – un lucru atât de elementar, încât l-aţi putea considera dincolo de orice îndoială – este în mod spectaculos şi convingător modificat.

Iluzia familiarului

Experienţa oferă date intuiţiei. Dar face mai mult decât atât: ea creează cadrul în care analizăm şi interpretăm ceea ce percepem. De exemplu, vă aşteptaţi, fără îndoială, ca un „copil sălbatic" crescut de o haită de lupi să interpreteze lumea dintr-o perspectivă total diferită de a noastră. Chiar şi comparaţii mai cuminţi, cum ar fi cele între oameni crescuţi în tradiţii culturale diferite, pot folosi pentru a înţelege în ce măsură experienţa ne determină înclinaţiile interpretative.

Există lucuri pe care le simţim cu *toţii*. Aceste experienţe universale sunt cele care formează convingerile şi determină aşteptările cel mai greu de identificat şi de pus la îndoială. Următorul exemplu este simplu,

dar grăitor. Dacă întrerupi lectura acestei cărți și te ridici în picioare, te poți mișca în trei direcții diferite, adică în trei dimensiuni spațiale diferite. Indiferent ce drum ai alege – oricât de complicat – va rezulta din combinarea mișcării prin ceea ce am putea numi „dimensiunea stânga-dreapta", „dimensiunea înainte-înapoi" și „dimensiunea sus-jos". La fiecare pas, faci implicit trei alegeri distincte care determină modul în care te miști prin aceste trei dimensiuni.

O afirmație echivalentă, întâlnită la prezentarea relativității speciale, este că orice poziție din univers poate fi complet determinată prin furnizarea a trei date în raport cu aceste trei dimensiuni. Într-un limbaj mai familiar, poți furniza o adresă într-un oraș prin numirea unei străzi (localizarea în „dimensiunea stânga-dreapta"), a unei alte străzi, care o intersectează pe prima (localizarea în „dimensiunea față-spate") și a numărului etajului (localizarea în „dimensiunea sus-jos"). Iar dintr-o perspectivă mai modernă, am văzut că lucrările lui Einstein ne îndeamnă să privim timpul ca pe o altă dimensiune („dimensiunea trecut-viitor"), obținând astfel patru dimensiuni (trei dimensiuni spațiale și o dimensiune temporală). Așadar, evenimentele din univers sunt specificate spunând când și unde au loc.

Această trăsătură a universului e atât de simplă, de firească și de generală, încât pare a fi în afara oricărei discuții. Totuși, în 1919, un matematician polonez puțin cunoscut, pe nume Theodor Kaluza, de la Universitatea din Königsberg, a avut curajul să pună la îndoială ceea ce era considerat evident – a sugerat că universul s-ar putea să nu aibă trei dimensiuni spațiale, ci *mai multe*. Uneori propunerile care par prostești chiar sunt prostești. Alteori însă zguduie temeliile fizicii. Deși a trecut ceva timp până să se impună, afirmația lui Kaluza a revoluționat formularea legilor fizicii. Șocul intuiției sale uimitoare se simte și în zilele noastre.

Ideea lui Kaluza și contribuția lui Klein la rafinarea ei

Afirmația că universul nostru ar putea avea mai mult de trei dimensiuni poate părea lipsită de sens, bizară sau mistică. În realitate însă, e concretă și perfect plauzibilă. Ca să ne dăm seama de asta, este mai

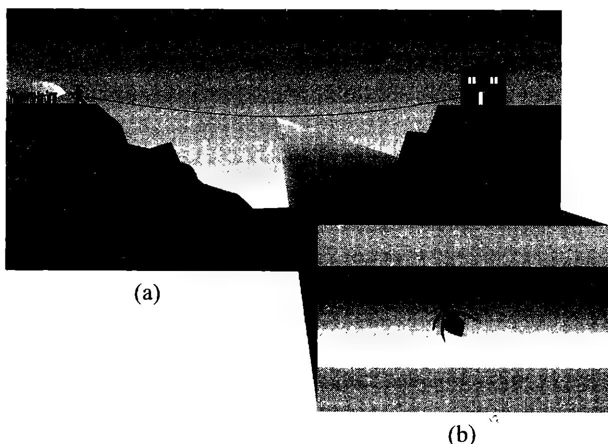


Figura 8.1 (a) Un furtun privit de la mare distanță pare un obiect unidimensional. (b) Când imaginea este mărită, o a doua dimensiune – de forma unui cerc care se încolăcește în jurul furtunului – devine vizibilă.

simplu să ne mutăm atenția de la întregul univers către un obiect familiar cum ar fi un furtun lung și subțire.

Să ne imaginăm că un furtun lung de câteva sute de metri este întins peste o prăpastie și îl privim de la câteva sute de metri, ca în figura 8.1 (a). De la această distanță vom observa cu ușurință lungimea furtunului desfășurat pe orizontală, dar *grosimea* lui va fi greu de distins. Din îndepărtatul nostru punct de observație, ne-am putea gândi că dacă o furnică ar fi constrânsă să trăiască pe acest furtun, ea va avea doar o singură dimensiune în care se poate deplasa, dimensiunea stânga-dreapta, de-a lungul furtunului. Dacă ar trebui să specificăm poziția furnicii la un moment dat, vom preciza doar *o singură* dată: distanța furnicii față de capătul din stânga (sau din dreapta) al furtunului. În concluzie, de la o distanță de sute de metri, furtunul lung pare un obiect unidimensional.

În realitate, știm că furtunul are și o grosime. De la sute de metri depărtare, s-ar putea să nu observăm acest lucru; însă, folosind un binoclu, putem distinge circumferința furtunului, așa cum se vede în figura 8.1 (b). Din această perspectivă mărită vedem că de fapt micuța furnică are *două* direcții independente în care se poate deplasa: de-a lungul dimensiunii stânga-dreapta, pe lungimea deja identificată a

furtunului, *și* în cea de-a doua „dimensiune în sensul direct sau în sensul invers al acelor de ceasornic“, în jurul furtunului. Remarcăm deci că, dacă vrem să precizăm poziția furnicuței la un moment dat, trebuie să dăm *două* coordonate: locul furnicii de-a lungul furtunului și poziția ei pe circumferința furtunului. Aceasta reflectă faptul că suprafața furtunului este bidimensională.[58]

Există o deosebire netă între aceste două dimensiuni. Direcția de-a lungul furtunului este lungă, extinsă și ușor vizibilă. Direcția ce înconjoară grosimea furtunului este scurtă, „încolăcită“ și mai greu de distins. Pentru a observa dimensiunea circulară, trebuie să examinăm furtunul cu mult mai mare precizie.

Acest exemplu subliniază una din caracteristicile subtile și importante ale dimensiunilor spațiale: ele sunt de două feluri. Unele pot fi mari, extinse, și deci evidente; altele sunt mici, încolăcite și mult mai greu de detectat. Bineînțeles că în acest exemplu nu a trebuit să facem un efort deosebit pentru a ne da seama de existența dimensiunii „încolăcite“ în jurul grosimii furtunului. A trebuit să folosim doar un binoclu. Dar, dacă am fi avut un furtun foarte subțire – ca un fir de păr sau ca un capilar – detectarea dimensiunii lui „încolăcite“ ar fi fost mult mai dificilă.

În 1919, într-o lucrare pe care i-a trimis-o lui Einstein, Kaluza făcea o afirmație uluitoare. El sugera că textura spațială a universului ar putea avea mai mult decât cele trei dimensiuni cunoscute. Argumentul în favoarea unei teze atât de radicale, așa cum vom arăta pe scurt, a fost observația lui Kaluza că în acest mod se crea un cadru elegant și atrăgător în care se îmbinau relativitatea generală a lui Einstein și teoria electromagnetică a lui Maxwell. Dar cum putem împăca această idee cu observația imediată că spațiul, *așa cum îl vedem noi*, are exact trei dimensiuni?

Răspunsul, implicit în lucrările lui Kaluza, apoi explicitat și rafinat de matematicianul suedez Oskar Klein în 1926, este acela că *textura spațială a universului nostru poate avea atât dimensiuni extinse, cât și dimensiuni strânse, încolăcite.* Adică, asemenea lungimii orizontale a furtunului, universul nostru are dimensiuni care sunt mari, extinse și ușor vizibile – cele trei dimensiuni spațiale cunoscute de noi. Dar asemenea circumferinței furtunului, universul poate avea și dimensiuni spațiale suplimentare, care sunt strâns încolăcite într-un spațiu mic – un spațiu atât de mic, încât până acum a scăpat celor mai fine dispozitive de detecție.

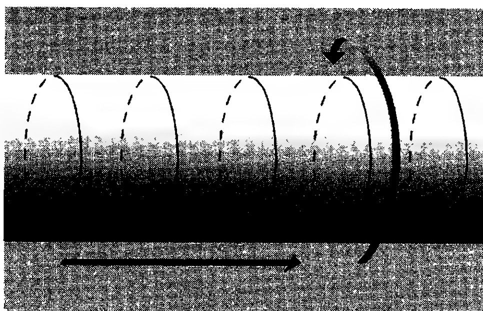


Figura 8.2 Suprafaţa unui furtun este bidimensională: una din dimensiuni (lungimea orizontală), evidenţiată prin săgeata dreaptă, este lungă şi extinsă; cealaltă dimensiune (circumferinţa), evidenţiată printr-o săgeată circulară, este scurtă şi încolăcită.

Pentru a avea o imagine mai clară asupra acestei remarcabile propuneri, să observăm cu atenţie furtunul. Să ne imaginăm că de-a lungul furtunului sunt desenate pe circumferinţă cercuri apropiate, de culoare neagră. La fel ca înainte, de departe, furtunul pare o linie subţire, unidimensională. Dar cu un binoclu vom putea detecta mai uşor acum, datorită cercurilor negre, dimensiunea încolăcită, aşa cum se observă în figura 8.2. Această figură scoate în evidenţă faptul că suprafaţa furtunului este bidimensională, cu o dimensiune mare, extinsă, şi cu o dimensiune mică, circulară. Kaluza şi Klein au sugerat că universul nostru ar fi similar, numai că ar avea trei dimensiuni spaţiale mari, extinse, şi o dimensiune circulară, mică – în total patru dimensiuni spaţiale. Este dificil de desenat ceva cu atâtea dimensiuni, deci pentru vizualizare va trebui să ne mărginim la o imagine care ilustrează două dimensiuni extinse, mari, şi una circulară, mică. În figura 8.3 avem un desen în care mărim textura spaţiului cam la fel cum am mărit-o în cazul furtunului.

Imaginea cea mai de jos a figurii prezintă structura aparentă a spaţiului – lumea obişnuită din jurul nostru – la o scară familiară a distanţelor, de exemplu de ordinul metrilor. Aceste distanţe sunt reprezentate prin caroiajele cele mai mari. În următoarele imagini ne concentrăm pe regiuni din ce în ce mai mici, pe care apoi le mărim pentru a le putea examina. La început, examinând structura spaţiului la scări

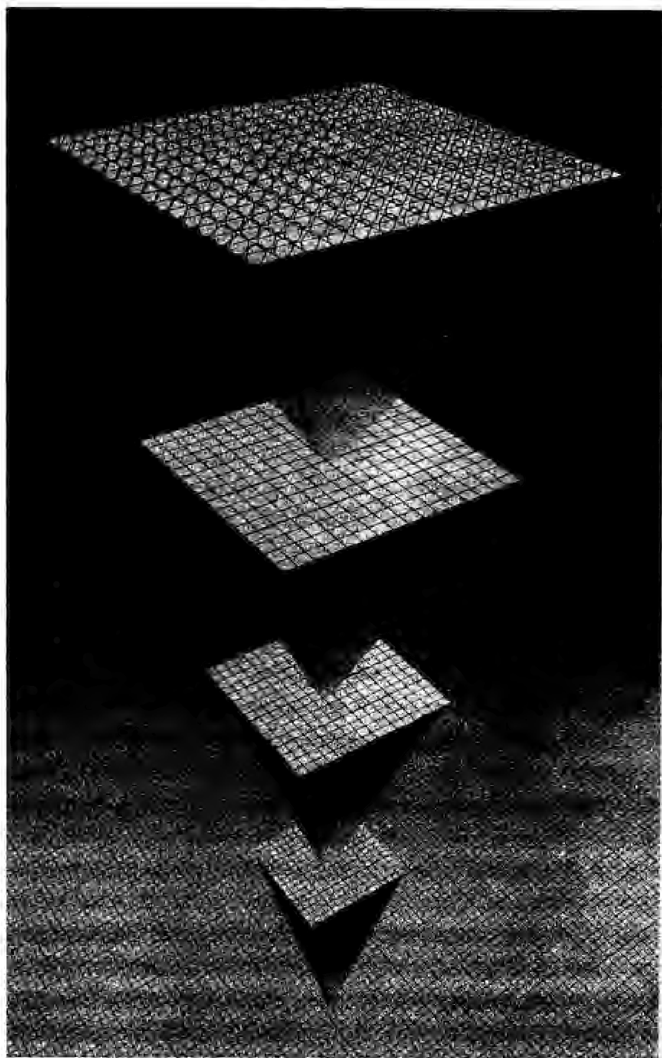


Figura 8.3 Asemenea figurii 5.1, fiecare nivel ce urmează reprezintă o mărire enormă a texturii spațiului prezentat în nivelul anterior. Universul nostru ar putea avea dimensiuni suplimentare, așa cum se vede în cel de-al patrulea nivel de mărire, atât timp cât ele sunt încolăcite într-un spațiu suficient de mic care să fi scăpat deocamdată detecției noastre.

de distanţe din ce în ce mai scurte nu observăm nimic important; ea pare să-şi păstreze aceeaşi formă de bază pe care o are la scări mai mari, aşa cum vedem în primele trei niveluri de mărire. Dar, continuând procesul de mărire în vederea unei examinări microscopice – nivelul patru de mărire în figura 8.3 – o dimensiune nouă, încolăcită, îşi face apariţia, foarte asemănătoare cu ochiurile circulare făcute de firele din textura unui covor. Kaluza şi Klein au sugerat că această dimensiune circulară suplimentară există în *fiecare* punct al celor trei dimensiuni extinse, la fel cum fiecărui punct de pe lungimea furtunului desfăşurat i se ataşează un ochi circular. (Pentru claritate vizuală am desenat câte o mostră ilustrativă a dimensiunii circulare în puncte echidistante în dimensiunile extinse.) În figura 8.4 prezentăm o imagine de aproape a texturii spaţiale, aşa cum a fost gândită de Kaluza şi Klein.

Similitudinea cu furtunul de grădină este evidentă, dar există câteva diferenţe importante. Universul are trei dimensiuni spaţiale mari, extinse (noi am desenat doar două dintre ele), spre deosebire de unica dimensiune a furtunului şi, în plus, noi vrem să descriem însăşi textura spaţială a *universului*, nu doar un obiect, cum este furtunul, care există *în* univers. Ideea de bază este însă aceeaşi: asemenea circumferinţei furtunului, dacă dimensiunea suplimentară încolăcită a universului este

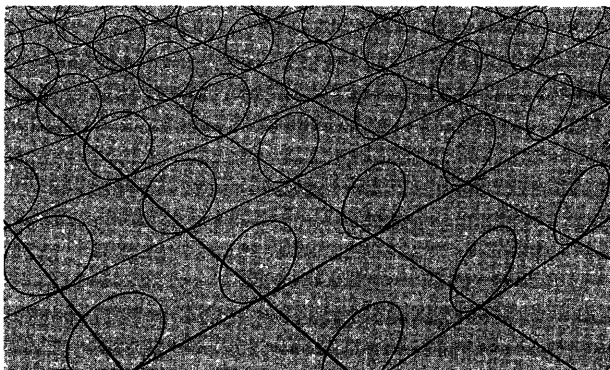


Figura 8.4 Liniile de caroiaj reprezintă dimensiunile extinse cunoscute nouă, iar cercurile reprezintă o nouă dimensiune încolăcită, microscopică. Asemenea buclelor circulare ale firelor ce formează ţesătura covorului, cercurile există în fiecare punct al dimensiunilor extinse, familiare – dar pentru claritate vizuală le desenăm doar la intersecţia liniilor de caroiaj.

extrem de mică, ea devine mai greu de detectat decât dimensiunile extinse, mari și evidente. De fapt, dacă dimensiunea este destul de mică, ea nu va putea fi detectată nici de cele mai puternice instrumente de mărire. Ceea ce e și mai important este că această dimensiune circulară *nu* seamănă cu o protuberanță circulară într-o dimensiune extinsă, familiară, așa cum ne face să credem ilustrația. Ea este de fapt o *nouă* dimensiune, care există *în fiecare punct* al dimensiunilor extinse, familiare, la fel cum există și fiecare din dimensiunile sus-jos, stânga-dreapta, înainte-înapoi. Este o direcție nouă și independentă în care s-ar putea mișca o furnică, dacă ea ar fi suficient de mică. Pentru a localiza spațial o asemenea furnică microscopică, ar trebui să precizăm unde se află în cele trei dimensiuni extinse, familiare (reprezentate de caroiaj) și, în plus, unde se află în dimensiunea circulară. Ne vor fi necesare *patru* date spațiale; dacă adăugăm și timpul, vom avea cinci informații spațio-temporale – una în plus față de ceea ce ne-am aștepta.

Prin urmare, în ciuda faptului că suntem conștienți de existența a doar trei dimensiuni spațiale, raționamentul lui Kaluza și Klein ne arată că aceasta nu exclude existența unor dimensiuni suplimentare încolăcite, cel puțin dacă ele sunt foarte mici. Universul poate avea deci mult mai multe dimensiuni decât cele pe care le vedem.

Cât de mic înseamnă „mic"? Echipamentele cele mai noi pot detecta structuri de până la o miliardime de miliardime de metru. Atât timp cât dimensiunea suplimentară este încolăcită la o dimensiune mai mică decât această distanță infimă, ea nu poate fi detectată. În 1926, Klein a combinat ideea inițială a lui Kaluza cu unele idei provenite din domeniul în plină dezvoltare al mecanicii cuantice. Calculele sale au arătat că dimensiunea circulară suplimentară ar putea fi de ordinul lungimii Planck, deci sub limitele accesibile experimental. De atunci, fizicienii numesc *teoria Kaluza-Klein* posibilitatea de a avea dimensiuni spațiale suplimentare minuscule.[59]

Pe furtun, înainte și înapoi

Exemplul sugestiv al furtunului și ilustrația din figura 8.3 sunt menite să ne dea o imagine asupra posibilității ca universul să aibă o dimensiune spațială suplimentară. Dar chiar și cercetătorilor din domeniu

le e greu să vizualizeze un univers cu mai mult de trei dimensiuni. De aceea, de multe ori fizicienii își antrenează imaginația analizând posibilitatea de a trăi într-un univers *cu un număr mai mic de dimensiuni* – urmând ideile minunatei cărți clasice de popularizare din 1884 a lui Edwin Abbot, *Flatland* (*Țara Plată*)[60] în care ne dăm seama treptat că universul are mai multe dimensiuni decât cele de care suntem direct conștienți. Să încercăm și noi acest lucru, imaginându-ne un univers bidimensional de forma furtunului. În acest scop, va trebui să renunțăm la perspectiva observatorului exterior, care vede furtunul ca pe un obiect din universul nostru. Dimpotrivă, va trebui să uităm de lumea pe care o cunoaștem și să intrăm în Universul Furtunului unde nu există altă extindere spațială în afara suprafeței unui furtun foarte lung (ni-l putem imagina de lungime infinită). Închipuiți-vă că sunteți o furnicuță care trăiește pe această suprafață.

Vom începe exagerând și mai mult lucrurile. Să ne imaginăm că lungimea dimensiunii circulare a Universului Furtunului este foarte mică, atât de mică, încât nici un locuitor al Furtunului nu e conștient de existența ei. În schimb, toți locuitorii Universului Furtunului consideră ca un fapt fundamental, evident și în afara oricărui dubiu, că universul are o *singură* dimensiune. (Dacă Universul Furtunului ar fi creat propria lui furnică-Einstein, acești locuitori ai Furtunului ar spune că universul lor are o dimensiune spațială și o dimensiune temporală.) Această caracteristică e atât de evidentă, încât locuitorii și-au numit patria *Țara Liniară*, subliniind astfel faptul că există o singură dimensiune spațială.

Viața în Țara Liniară e foarte diferită de cea pe care o cunoaștem noi. De exemplu, corpul cu care suntem obișnuiți *nu încape* în Țara Liniară. Indiferent cât de mult am încerca să ne remodelăm corpul, nu putem trece peste faptul că are lungime, lățime și grosime – întindere spațială în trei dimensiuni. În Țara Liniară nu e loc pentru un asemenea proiect extravagant. Să nu uităm că, în ciuda faptului că mintea noastră asociază imaginea Țării Liniare cu aceea a unui obiect filiform din spațiul nostru, trebuie într-adevăr să ne remodelăm gândirea așa încât să înțelegem că Țara Liniară este *tot universul* – tot ce există. Ca locuitor al Țării Liniare, trebuie să fii pe măsura extinderii ei spațiale. Încercați să vă imaginați acest lucru. Chiar dacă ați avea corpul unei furnici, tot nu ați încăpea. Va trebui să vă comprimați corpul până când va arăta mai curând ca acela al unui vierme, și apoi

să-l comprimați mai departe, până când nu va mai avea deloc grosime. Ca să poți trăi în Țara Liniară trebuie să fii o creatură cu o *singură* dimensiune.

Să ne imaginăm în continuare că avem câte un ochi la fiecare capăt al corpului. Spre deosebire de ochiul uman care se poate roti observând toate cele trei dimensiuni, ochii noștri de creatură liniară sunt pentru totdeauna fixați în poziția lor, holbându-se mereu în depărtarea unidimensională. Aceasta nu este o limitare anatomică a noului nostru corp. Pur și simplu în lumea liniară există o singură dimensiune, iar creaturile liniare pot privi doar într-o singură direcție. Înainte și înapoi epuizează toate posibilitățile Țării Liniare.

Putem încerca să mergem mai departe și să ne închipuim viața în Țara Liniară, dar ne dăm seama imediat că nu prea mai avem ce spune despre ea. De exemplu, dacă un alt locuitor al Țării Liniare ar fi de o parte sau de alta a ta, imaginează-ți cum l-ai vedea: ai vedea unul din ochii săi – cel întreptat către tine – dar, spre deosebire de ochiul uman, ochiul lui ar fi doar un punct. Ochii în Țara Liniară nu au nici un fel de trăsături și nu exprimă nici o emoție – nu este loc pentru aceste trăsături familiare. Mai mult, ai rămâne pentru totdeauna cu imaginea punctiformă a ochiului vecinului tău. Dacă ai vrea să-l depășești pentru a explora Țara Liniară de cealaltă parte a corpului său, ai avea o mare dezamăgire. *Nu poți trece de el.* El „blochează complet drumul“, iar în Țara Liniară nu e loc pentru depășire. Ordinea creaturilor liniare, împrăștiate de-a lungul Țării Liniare, e fixă și neschimbătoare. Ce viață ingrată!

La câteva mii de ani după o epifanie religioasă în Țara Liniară, o ființă liniară numită Kaluza K. Line le dă speranțe locuitorilor ei asupriți. Prin inspirație divină sau poate din pură exasperare după ani în care nu a făcut decât să privească în ochiul punctiform al vecinului său, el sugerează faptul că Țara Liniară nu ar fi unidimensională. Ce s-ar întâmpla, teoretizează el, dacă ar fi bidimensională, a doua dimensiune spațială fiind o mică direcție circulară care nu a fost încă detectată din cauza extinderii ei spațiale foarte reduse? El continuă prin a descrie o nouă viață cu numeroase perspective, presupunând că această nouă dimensiune spațială încolăcită s-ar mări – ceea ce ar fi posibil, cel puțin conform noilor descoperiri ale colegului său, Linestein. Kaluza K. Line descrie un univers fascinant care dă tuturor speranțe – un univers în care ființele liniare se pot mișca liber, pot trece una pe

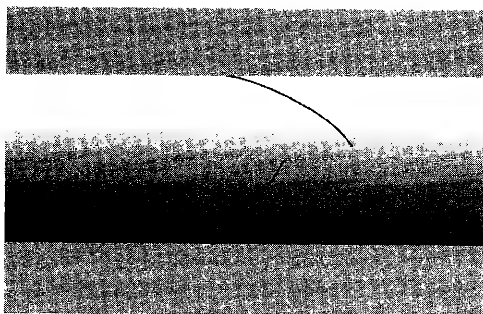


Figura 8.5 O ființă liniară poate vedea direct în interiorul corpului unei alte creaturi liniare atunci când Țara Liniară se extinde la Universul Furtunului.

lângă alta folosindu-se de cea de-a doua dimensiune: sfârșitul sclavagismului spațial. Ne dăm seama că aici Kaluza K. Line descrie viața în universul unui furtun „îngroșat".

Dacă dimensiunea circulară ar crește, „umflând" Țara Liniară în Universul Furtunului, viața s-ar schimba radical în multe privințe. Să luăm de exemplu corpul nostru. Pentru o ființă liniară tot ce există între cei doi ochi constituie interiorul corpului. Prin urmare, ochii sunt pentru corpul liniar precum pielea pentru corpul uman. Ei constituie bariera dintre interiorul corpului și lumea exterioară. Un doctor din Țara Liniară poate avea acces la interiorul corpului liniar doar prin străpungerea suprafeței – cu alte cuvinte „operațiile" din Țara Liniară se fac prin ochi.

Să ne imaginăm ce se întâmplă dacă Țara Liniară are o dimensiune secretă încolăcită, așa cum sugerează Kaluza K. Line, iar această dimensiune crește la o mărime observabilă. Atunci o ființă liniară poate vedea corpul alteia sub un anumit unghi, deci poate vedea direct în interior, așa cum arată figura 8.5. Folosind această a doua dimensiune, un doctor poate opera corpul ființelor liniare, ajungând direct în interiorul expus. Ce ciudățenie! Bineînțeles că, în timp, ființele liniare vor dobândi un acoperământ asemenea pielii, pentru a proteja interiorul, expus acum, al corpului lor. Și în plus ele vor evolua fără doar și poate în ființe care au lungime, dar și lățime: ființe plate ce alunecă în Universul bidimensional al Furtunului, așa cum se vede în figura 8.6. Dacă dimensiunea circulară ar crește foarte mult, acest univers bidimensional ar

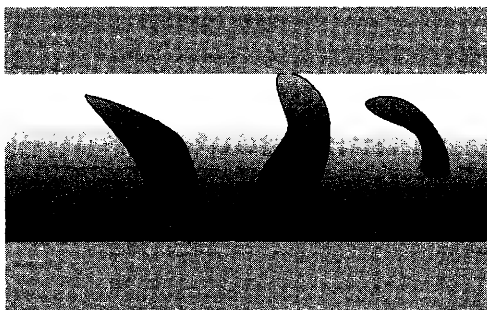


Figura 8.6 Ființe plate, bidimensionale, trăind în Universul Furtunului.

deveni asemănător Țării Plate descrise de Abbott – o lume bidimensională imaginară pe care Abbott a încărcat-o cu o bogată moștenire culturală și chiar cu un sistem de caste bazat pe forma geometrică a indivizilor. Dacă e greu de imaginat că s-ar putea petrece ceva interesant în Țara Liniară – nu e destul spațiu –, viața în Universul Furtunului e plină de posibilități. Evoluția de la o dimensiune spațială observabilă la două este spectaculoasă.

Și, din nou, refrenul: de ce să ne oprim aici? Însuși universul bidimensional ar putea avea o dimensiune curbată ascunsă, fiind deci tridimensional. Putem ilustra acest fapt în figura 8.4, pornind acum de la ipoteza că *există* doar două dimensiuni spațiale extinse (deși atunci când am prezentat această figură pentru prima oară am spus că acel caroiaj reprezintă de fapt trei dimensiuni extinse). Dacă dimensiunea circulară s-ar extinde, o ființă bidimensională s-ar găsi într-o nouă și vastă lume, în care mișcarea nu e limitată doar la stânga-dreapta și înainte-înapoi. Acum e posibilă și mișcarea în cea de-a treia dimensiune – direcția „sus-jos“ de-a lungul cercului. De fapt, dacă dimensiunea circulară ar crește suficient de mult, ar putea deveni universul *nostru* tridimensional. În prezent nu știm dacă vreuna din cele trei dimensiuni spațiale ale universului nostru se extinde la infinit sau dacă se curbează sub forma unui cerc uriaș, dincolo de bătaia celor mai puternice telescoape de care dispunem. Dacă dimensiunea circulară din figura 8.4 ar crește suficient de mult, dacă s-ar extinde cu miliarde de ani-lumină, figura ar putea deveni un desen al lumii noastre.

Dar refrenul revine: de ce să ne oprim aici? Ajungem astfel la viziunea expusă de Kaluza și Klein: universul nostru ar avea o a patra

dimensiune spaţială încolăcită, care nu a fost anticipată până acum. Dacă această posibilitate uluitoare, sau generalizarea ei la descoperirea altor numeroase dimensiuni încolăcite (pe care le vom discuta ulterior), este adevărată şi dacă aceste dimensiuni încolăcite s-ar extinde la rândul lor la o dimensiune macroscopică, exemplele discutate anterior privind spaţiile cu mai puţine dimensiuni ne arată clar că viaţa, aşa cum o cunoaştem noi, s-ar modifica radical.

Dar, chiar dacă aceste dimensiuni ar rămâne încolăcite şi mici, însăşi existenţa unor asemenea dimensiuni ar avea implicaţii profunde.

Unificarea în mai multe dimensiuni

Deşi afirmaţia făcută de Kaluza în 1919 privind faptul că universul ar avea mai multe dimensiuni spaţiale decât se credea a deschis posibilităţi nebănuite, a existat totuşi altceva care a făcut-o atât de atrăgătoare. Einstein formulase teoria generală a relativităţii într-un cadru familiar, în care universul avea trei dimensiuni spaţiale şi una temporală. Formalismul matematic al acestei teorii putea fi însă extins direct pentru a scrie ecuaţiile analoage valabile în cazul unui univers cu dimensiuni spaţiale suplimentare. Făcând presupunerea „modestă" a unei singure dimensiuni spaţiale suplimentare, Kaluza a efectuat calculul matematic şi a obţinut noile ecuaţii.

El a descoperit că, în formularea revizuită, ecuaţiile care se refereau la cele trei dimensiuni spaţiale erau identice cu cele ale lui Einstein. Dar pentru că a inclus o dimensiune suplimentară, aşa cum era de aşteptat, Kaluza a găsit ecuaţii suplimentare faţă de cele ale lui Einstein. După studierea acestor noi ecuaţii asociate cu noua dimensiune, Kaluza a descoperit ceva incredibil. Ecuaţiile care erau „în plus" nu erau altele decât cele găsite de Maxwell în 1880 şi care descriu forţa electromagnetică! Adăugând o nouă dimensiune spaţială, Kaluza unificase teoria gravitaţiei, a lui Einstein, cu teoria luminii, a lui Maxwell.

Înainte ca aceste afirmaţii să fie făcute de Kaluza, gravitaţia şi electromagnetismul erau considerate independente una de alta; nimic nu sugerase până atunci că ar putea exista o legătură între ele. Având însă curajul de a-şi imagina că universul nostru are o dimensiune spaţială suplimentară, Kaluza a descoperit această profundă legătură. Teoria

sa susţinea că gravitaţia şi electromagnetismul sunt asociate ondulaţiilor din textura spaţiului. Gravitaţia este transmisă de unde care se propagă în cele trei dimensiuni familiare nouă, în timp ce electromagnetismul este transmis de nişte unde care implică noua dimensiune curbată.

Kaluza i-a trimis lui Einstein lucrarea sa, iar acesta a fost la început destul de interesat. Pe 21 aprilie 1919, Einstein i-a răspuns lui Kaluza spunându-i că nu-i trecuse niciodată prin minte că unificarea poate fi realizată „printr-o lume cilindrică cu cinci dimensiuni [patru spațiale și una temporală]." „La prima vedere îmi place enorm ideea dumneavoastră", a adăugat el.[61] Totuși, o săptămână mai târziu, Einstein i-a scris din nou lui Kaluza, de data asta cu mai mult scepticism: „Am citit lucrarea dumneavoastră și o găsesc foarte interesantă. Până acum nu văd nicăieri vreo imposibilitate. Totuși, trebuie să recunosc că argumentele nu par suficient de convingătoare."[62] Dar apoi, pe 14 octombrie 1921, doi ani mai târziu, deci după ce avusese timp să digere mai bine noua abordare, Einstein i-a scris din nou lui Kaluza, spunând: „Regret că v-am împiedicat să vă publicați ideea privind unificarea gravitației și electricității acum doi ani. [...] Dacă doriți, voi prezenta totuși lucrarea la academie."[63] Cu întârziere, Kaluza a primit până la urmă aprobarea maestrului.

Deși era o idee frumoasă, studiile ulterioare asupra propunerii făcute de Kaluza și contribuțiilor aduse de Klein au arătat că ideea intra în contradicție cu datele experimentale. Simpla încercare de a include electronul în cadrul teoriei ducea la relații între masa și sarcina sa, care erau total diferite de măsurătorile experimentale. Pentru că nu a fost găsită nici o posibilitate clară de a rezolva această problemă, mulți dintre fizicienii care fuseseră entuziasmați de ideea lui Kaluza și-au pierdut interesul. Einstein, împreună cu alți fizicieni, a continuat din când în când să sondeze posibilitatea existenței unor dimensiuni suplimentare încolăcite, dar curând asemenea încercări au devenit marginale în fizica teoretică.

În realitate însă, ideea lui Kaluza era cu mult înaintea timpurilor ei. Anii 1920 au marcat începutul marilor cercetări în fizica teoretică şi experimentală legate de înţelegerea lumii microscopice. Teoreticienii erau prea ocupaţi să dezvolte structura mecanicii cuantice şi a teoriei cuantice de câmp. Experimentatorii aveau de descoperit proprietăţile detaliate ale atomului şi ale altor constituenţi elementari ai mate-

riei. Teoria călăuzea experimentul, iar experimentul cizela teoria, şi astfel fizicienii au împins limitele cunoaşterii vreme de jumătate de secol pentru a ajunge în sfârşit la descoperirea modelului standard. Nu e de mirare că speculaţiile privind existenţa unei dimensiuni suplimentare au fost puse de-o parte de-a lungul acestor ani productivi şi tumultuoşi. Fizicienii explorau metode cuantice puternice, ale căror implicaţii duceau la predicţii testabile experimental, deci nu este de mirare că trezea puţin interes o ipoteză conform căreia universul nostru ar fi unul foarte diferit la scara distanţelor foarte mici – atât de mici, încât nu puteau fi investigate nici cu cele mai fine instrumente de măsură.

Dar, mai devreme sau mai târziu, lucrurile se aşază. La sfârşitul anilor '60 şi începutul anilor '70, modelul standard apăruse deja. La sfârşitul anilor '70 şi începutul anilor '80, multe din predicţiile sale fuseseră verificate experimental, iar majoritatea fizicienilor care se ocupau cu fizica particulelor erau deja de acord că era numai o chestiune de timp până când toate celelalte predicţii vor fi confirmate. Deşi rămâneau nerezolvate câteva detalii importante, se considera că problemele majore privind forţele tari, slabe şi electromagnetice fuseseră rezolvate.

Venise în sfârşit timpul să ne întoarcem la problema cea mai importantă: conflictul enigmatic dintre relativitatea generală şi mecanica cuantică. Succesul obţinut în formularea unei teorii cuantice a trei dintre forţele naturii îi îndemna pe fizicieni să încerce să includă şi gravitaţia, cea de-a patra forţă, în ecuaţie. După investigarea nereuşită a mai multor sugestii, comunitatea fizicienilor a devenit mai receptivă la abordările radicale. Astfel, după ce a fost lăsată să moară în anii '20, teoria Kaluza-Klein a fost resuscitată.

Teoria modernă Kaluza-Klein

În cei 60 de ani care se scurseseră de la apariţia ideii lui Kaluza, fizica se schimbase substanţial, iar înţelegerea ei se adâncise. Mecanica cuantică fusese complet formulată şi verificată experimental. Forţele slabe şi cele tari, necunoscute în anii 1920, fuseseră descoperite şi înţelese pe deplin. Unii fizicieni sugerau că ideea lui Kaluza eşuase pentru că el nu cunoştea aceste forţe noi şi de aceea fusese prea

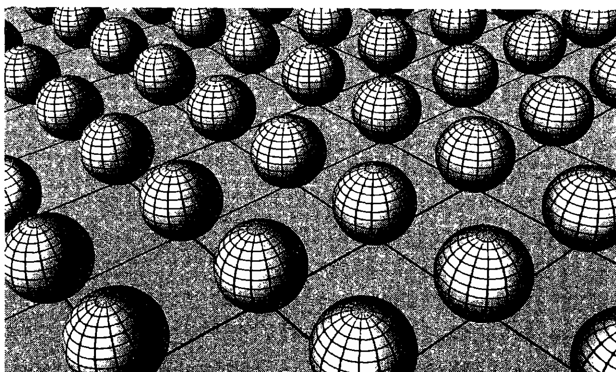


Figura 8.7 Două dimensiuni suplimentare încolăcite în formă de sferă.

conservator în reamenajarea spațiului. Mai multe forțe se traduceau prin necesitatea de a avea mai multe dimensiuni. Se susținea că o singură nouă dimensiune circulară, deşi dădea indicii despre legătura dintre relativitatea generală și electromagnetism, nu era suficientă.

Pe la mijlocul anilor 1970, cercetătorii depuneau eforturi intense, concentrându-se asupra unor teorii cu mai multe dimensiuni spațiale încolăcite. Figura 8.7 ilustrează un exemplu cu două dimensiuni suplimentare care sunt încolăcite formând suprafața unei mingi – mai exact, o sferă. Ca și în cazul unei singure dimensiuni circulare, aceste dimensiuni suplimentare sunt atașate *fiecărui punct* al dimensiunii extinse cunoscute. (Pentru claritate vizuală am figurat doar o mostră ilustrativă a dimensiunilor sferice în puncte echidistante pe un caroiaj din dimensiunile extinse.) Putem propune un număr diferit de dimensiuni suplimentare, dar ne putem de asemenea închipui și alte forme pentru aceste dimensiuni. De exemplu, în figura 8.8 ilustrăm posibilitatea ca cele două dimensiuni suplimentare să aibă forma unui covrig – adică formă de tor. Chiar dacă depăşeşc posibilitățile noastre de a le ilustra, pot fi imaginate modele și mai complicate, în care să existe trei, patru, cinci sau orice alt număr de dimensiuni spațiale suplimentare, încolăcite într-un spectru larg de forme exotice. Cerința fundamentală este ca toate aceste dimensiuni să aibă o extindere spațială mai mică decât cea mai mică scară de lungimi pe care o putem sonda, pentru că nu există nici un experiment care să le fi confirmat deocamdată existența.

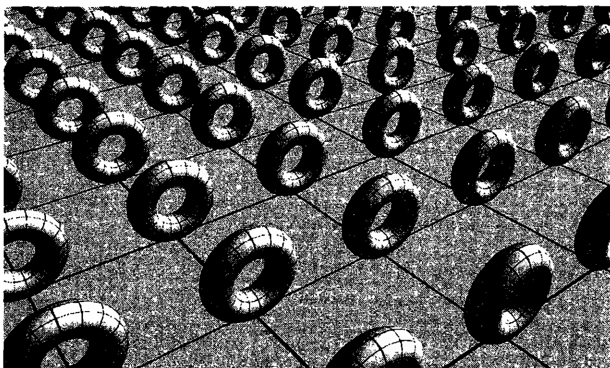


Figura 8.8 Două dimensiuni suplimentare încolăcite în formă de covrig (tor).

Cele mai promițătoare propuneri pentru un număr mai mare de dimensiuni erau cele care încorporau și supersimetria. Fizicienii sperau că anulările parțiale ale celor mai mari fluctuații cuantice, apărute datorită împerecherii particulelor superpartener, vor împăca gravitația și mecanica cuantică. Ei au născocit numele de *supergravitație în mai multe dimensiuni* pentru acele teorii care cuprindeau gravitația, dimensiunile suplimentare și supersimetria.

Ca și în cazul versiunii inițiale propuse de Kaluza, diverse versiuni ale supergravitației în mai multe dimensiuni păreau la început foarte promițătoare. Noile ecuații ce rezultau datorită dimensiunilor suplimentare erau foarte asemănătoare cu cele care descriu electromagnetismul și forțele tari și slabe. Însă o cercetare mai amănunțită dovedea că vechile probleme persistau. Cel mai important însă era faptul că acele ondulații cuantice nedorite ale spațiului pe distanțe scurte erau diminuate, dar nu suficient de mult pentru a duce la o teorie acceptabilă. De asemenea, fizicienii și-au dat seama că este foarte greu să găsească o teorie în mai multe dimensiuni care să încorporeze toate caracteristicile forțelor și ale materiei.[64]

Devenea din ce în ce mai clar că fragmente ale unei teorii unificate ieșeau la suprafață, dar lipsea încă elementul-cheie care să le unească într-o formulare cuantică perfect coerentă. Abia în 1984 a apărut în scenă piesa care lipsea – teoria corzilor – și a primit rolul principal.

Mai multe dimensiuni şi teoria corzilor

Probabil v-aţi convins deja că universul nostru *ar putea* avea dimensiuni spaţiale suplimentare încolăcite; bineînţeles, atât timp cât ele sunt suficient de mici, nu există nimic care să le excludă. Dar dimensiunile suplimentare ne-ar putea apărea ca fiind un artificiu. Neputinţa noastră de a sonda distanţe mai mici de o miliardime de miliardime de metru lasă loc nu numai dimensiunilor suplimentare foarte mici, dar şi altor speculaţii, precum existenţa unei civilizaţii microscopice, cu omuleţi verzi foarte, foarte mici. Deşi prima pare mai raţională decât a doua, postularea oricăreia dintre aceste posibilităţi netestate experimental – şi, în prezent, netestabile – pare la fel de arbitrară.

Aşa se prezentau lucrurile până la apariţia teoriei corzilor. Această teorie rezolvă principala dilemă cu care se confruntă fizica contemporană – incompatibilitatea dintre mecanica cuantică şi teoria generală a relativităţii – şi unifică înţelegerea noastră privind constituenţii materiali fundamentali ai naturii şi forţele care apar. Dar, pentru ca toate acestea să se adeverească, teoria corzilor *impune condiția* ca universul să aibă dimensiuni suplimentare.

Şi iată de ce. Una dintre ideile de bază ale mecanicii cuantice este aceea că posibilităţile noastre de a face predicţii se limitează în mod fundamental la a afirma că un anume rezultat se va putea obţine cu o anume probabilitate. Deşi Einstein a considerat că e o trăsătură stânjenitoare a ştiinţei moderne, şi s-ar putea să-i daţi dreptate, ea este un fapt real. Să-l acceptăm. Dar noi mai ştim şi că probabilităţile sunt întotdeauna numere cuprinse între 0 şi 1 – sau, atunci când sunt exprimate prin procente, ele sunt numere între 0 şi 100. Fizicienii au remarcat că un semn caracteristic al faptului că o teorie cuantică e greşită este acela că anumite calcule dau valori ale probabilităților care nu se încadrează în acest interval acceptabil. De exemplu, am menționat anterior că un semn clar de incompatibilitate între relativitatea generală şi mecanica cuantică, în formalismul cu particule punctiforme, este că se obţin din calcule probabilităţi infinite. Aşa cum am văzut, teoria corzilor ne scapă de rezultatul infinit. Dar nu am menționat încă faptul că rămâne o dificultate mai subtilă. La începuturile teoriei corzilor, fizicienii au descoperit că anumite calcule conduceau către probabilităţi *negative*, care sunt şi ele în afara intervalului acceptabil. Deci, la o primă vedere, se părea că teoria corzilor ar trebui scoasă din discuţie.

Cu o formidabilă încăpățânare, fizicienii au căutat și au găsit cauza acestui rezultat inacceptabil. Explicația începe cu o observație simplă. Dacă o coardă este constrânsă să stea pe o suprafață bidimensională – de exemplu pe suprafața unei mese sau a unui furtun –, numărul de direcții independente în care aceasta poate vibra este redus la *două*: direcțiile stânga-dreapta și față-spate pe suprafața respectivă. Orice mod de vibrație pe această suprafață implică o combinație de vibrații în aceste două direcții. De aici rezultă că o coardă din Țara Plată, din Universul Furtunului sau din orice alt univers bidimensional este de asemenea constrânsă să vibreze în total în două direcții spațiale independente. Dacă totuși corzii i se permite să părăsească suprafața, numărul direcțiilor de vibrație independente va crește la trei, deoarece coarda va putea oscila acum și în direcția sus-jos. Analog, într-un univers cu trei dimensiuni spațiale, o coardă poate vibra în trei direcții independente. Deși devine mai greu de imaginat, principiul se repetă: într-un univers cu din ce în ce mai multe dimensiuni spațiale există din ce în ce mai multe direcții independente în care coarda poate vibra.

Subliniem acest aspect privind vibrațiile corzii pentru că fizicienii au descoperit că rezultatele supărătoare se datorau sensibilității excesive la numărul de direcții independente în care coarda putea vibra. Probabilitățile negative apăreau în urma unor *nepotriviri* dintre cerințele teoriei și ceea ce realitatea se pare că impune: calculele arătau că, dacă corzile ar putea vibra în nouă direcții spațiale independente, toate probabilitățile negative s-ar anula. Teoria suna grozav, dar ce folos? Dacă teoria corzilor trebuie să descrie lumea noastră tridimensională, atunci problema tot nu e rezolvată.

Oare chiar nu e rezolvată? După mai bine de jumătate de secol, vedem că teoria lui Kaluza și Klein ne oferă o portiță de ieșire. Cum corzile sunt atât de mici, ele pot vibra nu numai în dimensiunile mari, extinse, ci și în unele foarte mici, încolăcite. Astfel *putem* obține cele nouă dimensiuni spațiale necesare teoriei corzilor și în universul *nostru*, presupunând – în maniera lui Kaluza și Klein – că în plus față de cele trei dimensiuni spațiale extinse, familiare, mai există alte șase dimensiuni spațiale încolăcite. Astfel, teoria corzilor, care părea să fie în pragul eliminării din rândul teoriilor fizic relevante, este salvată. Mai mult, în loc să postuleze existența acestor dimensiuni suplimentare, așa cum făcuseră Kaluza, Klein și cei care le-au urmat, teoria corzilor le *impune*. Pentru ca teoria corzilor să fie valabilă, universul

trebuie să aibă nouă dimensiuni spaţiale şi una temporală, deci în total zece dimensiuni. Astfel, propunerea lui Kaluza din 1919 îşi găseşte un avocat foarte puternic şi convingător.

Câteva întrebări

Toate acestea ridică un număr de întrebări. Mai întâi, de ce teoria corzilor necesită tocmai nouă dimensiuni spaţiale pentru a evita valori absurde ale probabilităţilor? Aceasta este probabil cea mai dificilă întrebare la care teoria corzilor trebuie să răspundă fără să apeleze la formalismul matematic. Un calcul direct în teoria corzilor ne oferă imediat răspunsul, dar nimeni nu poate da o explicaţie intuitivă, fără a intra în probleme tehnice, pentru acest număr. Odată, fizicianul Ernest Rutherford a spus că dacă nu poţi explica în termeni netehnici un rezultat simplu, atunci probabil că nici nu-l înţelegi cu adevărat. El nu spunea că rezultatul e greşit; spunea doar că nu-i înţelegi pe deplin originea, sensul sau implicaţiile. Poate că e adevărat şi se aplică şi în cazul dimensiunilor suplimentare ale teoriei corzilor. (E momentul să facem o paranteză şi să amintim un element esenţial al celei de-a doua revoluţii a supercorzilor, care va fi prezentat în capitolul 12. Calculul care duce la concluzia că trebuie să fie zece dimensiuni spaţio-temporale – nouă spaţiale şi una temporală – s-a dovedit a fi unul *aproximativ*. Pe la mijlocul anilor 1990, Witten, bazându-se pe propriile lui lucrări, precum şi pe cele ale lui Michael Duff de la Universitatea A&M din Texas şi Chris Hull, împreună cu Paul Townsend de la Cambridge, a adus dovezi convingătoare că acest calcul aproximativ *pierde* o dimensiune spaţială: spre mirarea multor teoreticieni ai corzilor, el a adus argumente în favoarea ideii că, de fapt, teoria corzilor necesită *zece* dimensiuni spaţiale şi una temporală, deci în total *unsprezece* dimensiuni. Noi vom ignora acest rezultat important până vom ajunge la capitolul 12, pentru că nu influenţează direct cele ce vom discuta până atunci.)

În al doilea rând, dacă ecuaţiile teoriei corzilor (sau, mai precis, ecuaţiile aproximative care au dus la discuţia premergătoare capitolului 12) demonstrează că universul are nouă dimensiuni spaţiale şi una temporală, atunci de ce trei dimensiuni spaţiale (şi una temporală)

sunt mari, extinse, în timp ce toate celelalte sunt minuscule şi încolăcite? De ce nu sunt *toate* extinse, ori toate încolăcite, ori de ce nu există o altă variantă intermediară? Pentru moment, nimeni nu cunoaşte răspunsul la această întrebare. Dacă teoria corzilor este corectă, s-ar putea ca, în timp, să aflăm răspunsul exact, însă deocamdată nu am ajuns la o înțelegere atât de profundă încât să ştim de ce se întâmplă aşa. Asta nu înseamnă că nu au existat tot felul de încercări de a explica situația. De exemplu, din perspectivă cosmică, putem să ne imaginăm că toate dimensiunile pornesc dintr-o fază inițială, când sunt strâns încolăcite, pentru ca apoi, în urma unei explozii asemeni big bang-ului, trei dimensiuni spațiale şi una temporală să fie desfăşurate şi să se extindă până la dimensiunile lor actuale, în timp ce celelalte dimensiuni să rămână mici. S-a explicat în diverse feluri de ce doar trei dintre dimensiunile spațiale au crescut, aşa cum se va arăta în capitolul 14, însă toate aceste argumente sunt într-un stadiu incipient. În cele ce urmează, vom presupune că toate dimensiunile spațiale, exceptând cele trei, sunt încolăcite, în conformitate cu ceea ce vedem în jurul nostru. Unul dintre scopurile principale ale cercetărilor actuale este de a arăta că această presupunere este de fapt o cerință a teoriei corzilor.

În al treilea rând, luând în considerare numeroasele dimensiuni suplimentare, este oare posibil ca unele dintre acestea să fie dimensiuni *temporale,* spre deosebire de dimensiunile spațiale suplimentare? Dacă ne gândim mai bine, ne dăm seama că aceasta ar fi o situație într-adevăr ciudată. Înțelegem cu toții intuitiv ce înseamnă un univers cu mai multe dimensiuni spațiale, din moment ce trăim într-o lume în care avem constant de-a face cu pluralitatea – trei. Dar ce ar putea însemna timp multiplu? Unul s-ar alinia timpului aşa cum îl trăim în prezent la nivel psihologic, iar celălalt ar fi cumva „diferit"?

Lucrurile devin încă şi mai ciudate când ne gândim la o dimensiune temporală încolăcită. De exemplu, dacă o furnică minusculă se plimbă în jurul unei dimensiuni spațiale suplimentare, care este încolăcită asemeni unui cerc, se va întoarce mereu în aceeaşi poziție atunci când încheie un circuit complet. Nu e deloc ciudat, din moment ce posibilitatea de a ne întoarce în acelaşi loc, dacă dorim, ne e cunoscută. Dar, dacă dimensiunea încolăcită este o dimensiune temporală, traversarea ei înseamnă întoarcerea, după un interval de timp, la un *moment anterior în timp*. Aceasta însă depăşeşte experiența noastră. Timpul, în accepțiunea noastră, este o dimensiune pe care o putem traversa doar într-o

singură direcție, în mod absolut inevitabil, neputându-ne întoarce la un anume moment care deja a trecut. Bineînțeles, s-ar putea ca dimensiunile temporale încolăcite să aibă proprietăți diferite de dimensiunea temporală vastă, familiară nouă, pe care ne-o imaginăm pornind încă de la apariția universului și continuând până la momentul actual. Însă, spre deosebire de dimensiunile spațiale suplimentare, dimensiunile temporale noi, necunoscute anterior, ar necesita o restructurare și mai drastică a modului nostru de a intui lumea. Unii teoreticieni au cercetat posibilitatea de a încorpora dimensiunile temporale suplimentare în teoria corzilor, dar deocamdată rezultatele nu sunt concludente. În prezentarea teoriei corzilor vom rămâne la o abordare mai „convențională", în care toate dimensiunile încolăcite sunt dimensiuni spațiale, dar incitanta posibilitate a unei noi dimensiuni temporale ar putea juca rolul ei în cercetările viitoare.

Implicațiile fizice ale dimensiunilor suplimentare

Ani de cercetări, începând cu lucrarea inițială a lui Kaluza, ne-au arătat că orice dimensiune suplimentară despre care fizicienii presupun că trebuie să fie mai mică decât dimensiunile direct observabile (din moment ce nu am detectat-o încă) poate avea efecte *indirecte* importante, pe care fizicienii le pot observa. În teoria corzilor, această legătură dintre proprietățile microscopice ale spațiului și fizica pe care noi o observăm e cât se poate de clară.

Să ne amintim că masele și sarcinile particulelor din teoria corzilor sunt determinate de modurile rezonante de vibrație posibile ale corzii. Dacă ne imaginăm o coardă minusculă care se mișcă și oscilează, veți înțelege că modurile rezonante sunt influențate de spațiul înconjurător. Să ne gândim, de exemplu, la valurile oceanului. În cazul valurilor care se formează departe de țărm, în imensa întindere de ape a oceanului, modurile de oscilație sunt libere să se formeze și să se deplaseze încoace și încolo. Oarecum același lucru se întâmplă și în cazul modurilor de vibrație ale unei corzi care se mișcă într-o dimensiune spațială mare, extinsă. După cum am văzut în capitolul 6, o asemenea coardă are o libertate egală de oscilație în oricare din direcțiile extinse, în orice moment. Dar, dacă un val al oceanului trece printr-o

zonă spaţial restrânsă, forma detaliată a mişcării undei sale va fi cert afectată de, să zicem, adâncimea apei, poziţia şi forma stâncilor întâlnite, canalele prin care apa este direcţionată şi aşa mai departe. Apoi să ne gândim la un tub de orgă sau la un corn englez. Sunetele pe care fiecare dintre aceste instrumente le poate produce sunt o consecinţă directă a modurilor rezonante de vibraţie ale curenţilor de aer din interiorul lor; acestea sunt determinate de mărimea şi forma precisă pe care o are instrumentul în interiorul căruia sunt canalizaţi curenţii de aer. Dimensiunile spaţiale încolăcite au un impact similar asupra posibilelor moduri de vibraţie ale unei corzi. Cum corzile minuscule vibrează în toate dimensiunile spaţiale, forma precisă în care aceste dimensiuni spaţiale sunt răsucite şi încolăcite influenţează şi constrânge considerabil modurile lor posibile de vibraţie. Aceste moduri, determinate în mod special de geometria dimensiunilor suplimentare, constituie gama proprietăţilor posibile ale particulelor observate în familiarele dimensiuni extinse. Asta înseamnă că *geometria dimensiunilor suplimentare determină atribute fizice fundamentale precum masele şi sarcinile particulelor observate de noi în cele trei dimensiuni spaţiale familiare nouă.*

Această concluzie este atât de profundă şi atât de importantă, încât o vom repeta. Conform teoriei corzilor, universul este format din corzi minuscule ale căror moduri rezonante de vibraţie constituie originea microscopică a maselor şi sarcinilor de forţă ale particulelor. Teoria corzilor necesită de asemenea dimensiuni spaţiale suplimentare care trebuie să fie încolăcite la mărimi foarte mici, pentru ca teoria să fie în acord cu faptul că aceste dimensiuni nu au fost niciodată observate de noi. Dar o coardă minusculă poate sonda un spaţiu minuscul. Atunci când o coardă se mişcă, oscilând în timp ce se deplasează, forma geometrică a dimensiunilor suplimentare joacă un rol critic în determinarea modurilor de vibraţie rezonante. Datorită faptului că modurile de vibraţie ale corzilor apar sub forma maselor sau sarcinilor particulelor elementare, tragem concluzia că aceste proprietăţi fundamentale ale universului sunt determinate într-o mare măsură de forma geometrică şi mărimea dimensiunilor suplimentare. Aceasta este una dintre descoperirile cu bătaie lungă ale teoriei corzilor.

Cum dimensiunile suplimentare influenţează atât de profund proprietăţile fizice fundamentale ale universului, a sosit momentul să înţelegem cum ar putea arăta aceste dimensiuni încolăcite.

Cum arată dimensiunile încolăcite?

Dimensiunile spațiale suplimentare ale teoriei corzilor nu pot fi „ghemuite“ în orice fel; ecuațiile care rezultă din teorie restrâng într-un mod foarte precis forma geometrică pe care ele o pot lua. În 1984, Philip Candelas, de la Universitatea din Austin, Texas, Gary Horowitz şi Andrew Strominger, de la Universitatea din Santa Barbara, California, şi Edward Witten au demonstrat că o anume clasă de forme geometrice şase-dimensionale satisfac aceste condiţii. Ele sunt cunoscute sub numele de *spațiile Calabi-Yau* (sau *formele Calabi-Yau*), în onoarea a doi matematicieni, Eugenio Calabi, de la Universitatea din Pennsylvania, şi Shing-Tung Yau, de la Universitatea Harvard, ale căror cercetări într-un context apropiat, dar anterioare teoriei corzilor, joacă un rol central în înțelegerea acestor spații. Deşi matematica ce descrie spațiile Calabi-Yau este complexă şi subtilă, ne putem totuşi face o idee despre cum arată ele cu ajutorul unui desen.[65]

În figura 8.9 prezentăm un exemplu de spațiu Calabi-Yau.[66] Când priviți figura, tineți cont de faptul că imaginea are limitări inerente. Aici încercăm să reprezentăm o formă şase-dimensională pe o foaie de hârtie bidimensională, iar acest lucru duce la distorsiuni semnificative. Totuşi, imaginea sugerează într-o anumită măsură felul în care arată spațiul Calabi-Yau.[67] Forma din figura 8.9 este doar una din zecile de mii de exemple de spații Calabi-Yau care corespund cerințelor stricte pe care trebuie să le îndeplinească dimensiunile supli-

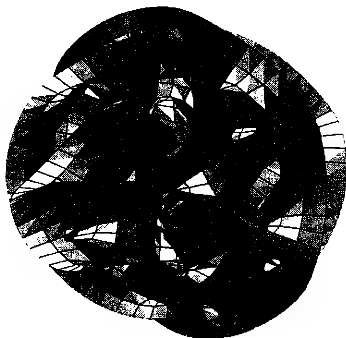


Figura 8.9 Exemplu de spațiu Calabi-Yau.

mentare rezultate din teoria corzilor. Deşi apartenenţa la un club cu zeci de mii de membri nu pare un mare privilegiu, trebuie să ne raportăm la numărul infinit de forme matematic posibile; în aceste condiții, spaţiile Calabi-Yau sunt într-adevăr rare.

Pentru a reuni acum toate elementele, să ne imaginăm că înlocuim fiecare din sferele din figura 8.7 – care reprezintă două dimensiuni încolăcite – cu câte un spațiu Calabi-Yau. Adică, în fiecare punct al spațiului tridimensional familiar, teoria corzilor susține că există încă șase dimensiuni pe care nu le-am anticipat, strâns încolăcite într-una din aceste forme complicate, așa cum e ilustrat în figura 8.10. Aceste dimensiuni sunt o parte integrantă şi omniprezentă a texturii spațiale; ele există peste tot. De exemplu, dacă îți miști mâna descriind un arc, te vei mişca nu numai prin spațiul celor trei dimensiuni extinse, ci şi prin aceste dimensiuni încolăcite. Bineînțeles că datorită faptului că dimensiunile încolăcite sunt atât de mici, mâna le va parcurge de un enorm număr de ori, întorcându-te de fiecare dată în punctul de pornire. Dimensiunea lor minusculă face să nu existe prea mult loc pentru mişcarea unui obiect atât de mare cum este mâna – toate mărimile legate de mişcarea mâinii se mediază, astfel că la încetarea mişcării mâinii nu vei resimți în nici un fel călătoria întreprinsă prin dimensiunile încolăcite Calabi-Yau.

Aceasta este o trăsătură uimitoare a teoriei corzilor. Dar dacă aveți o minte practică, va trebui să readuceți discuția la o problemă esențială

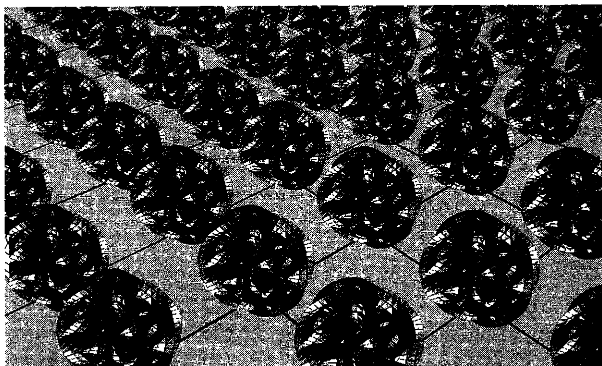


Figura 8.10 Conform teoriei corzilor, universul are dimensiuni suplimentare încolăcite în forme Calabi-Yau.

şi concretă. Acum, când înțelegem mai bine cum arată dimensiunile suplimentare, care ar fi proprietăţile fizice rezultate din corzile care vibrează prin ele şi cum se potrivesc acestea cu proprietăţile observate experimental? Aceasta este întrebarea de 64 000 de dolari a teoriei corzilor.

CAPITOLUL 9

Potul cel mare: dovezile experimentale

Nimic nu i-ar încânta mai mult pe teoreticienii corzilor decât să prezinte lumii o listă detaliată de predicţii testabile experimental. Nu se poate stabili că o teorie descrie lumea din jurul nostru fără ca aceasta să-şi supună predicţiile verificărilor experimentale. Şi, indiferent cât de convingătoare ar fi imaginea prezentată de teoria corzilor, dacă nu descrie cu acurateţe universul nostru, ea are pentru noi aceeaşi relevanţă ca un joc video complicat.

Edward Witten declară plin de mândrie că teoria corzilor a făcut deja o predicţie spectaculoasă confirmată experimental: „teoria corzilor are remarcabila proprietate de a *prezice gravitaţia*"[68]. Ceea ce vrea Witten să spună este că Newton şi Einstein au elaborat teorii ale gravitaţiei datorită faptului că observaţiile lor asupra lumii le-au demonstrat în mod indubitabil că gravitaţia există, iar din acest motiv e necesară o explicaţie precisă şi bine fundamentată a ei. Dimpotrivă, un fizician care studiază teoria corzilor, chiar dacă nu cunoaşte deloc relativitatea generală, va fi condus inevitabil la ea de cadrul teoriei corzilor. Prin modul de vibraţie al gravitonului cu masă nulă şi spin 2, teoria corzilor a împletit gravitaţia în textura ei teoretică. După cum spunea Witten: „Faptul că gravitaţia este o consecinţă a teoriei corzilor e una din cele mai mari descoperiri făcute vreodată".[69] Recunoscând că această „predicţie" e mai precis o „postdicţie", fiindcă fizicienii au descoperit descrierile teoretice ale gravitaţiei cu mult înainte de a afla de teoria corzilor, Witten subliniază că e vorba doar de un simplu accident istoric. La alte civilizaţii avansate din univers, adaugă el purtat de imaginaţie, se prea poate ca teoria corzilor să fi fost descoperită prima, iar teoria gravitaţiei să fi apărut ca o consecinţă a ei.

Cum noi suntem legaţi de istoria ştiinţei de pe planeta noastră, mulţi consideră că această postdicţie a gravitaţiei nu e o confirmare experimentală convingătoare a teoriei corzilor. Majoritatea fizicienilor ar fi mult mai bucuroşi dacă s-ar reuşi fie o predicţie de bună-credinţă din teoria corzilor pe care experimentatorii s-o confirme, fie o postdicţie a unei proprietăţi a lumii (de exemplu, masa electronului sau existenţa celor trei familii de particule) pentru care nu există deocamdată nici o explicaţie. În acest capitol vom vedea cât de departe au avansat teoreticienii corzilor pentru atingerea acestor obiective.

Paradoxal, deși teoria corzilor poate fi teoria *cea mai bogată* în predicții dintre câte au studiat vreodată fizicienii – o teorie care ar explica proprietățile fundamentale ale naturii –, fizicienii nu au putut face predicții cu precizie suficient de mare pentru a permite compararea lor cu datele experimentale. Asemeni unui copil care își primeşte darul mult dorit de Crăciun, însă nu-l poate pune în funcțiune din cauza lipsei câtorva pagini cu instrucțiuni din manualul de utilizare, fizicienii din ziua de azi sunt în posesia a ceea ce ar putea fi Sfântul Graal al fizicii moderne, dar nu-i pot folosi forța de a face predicții înainte de a *scrie* întregul lui manual de instrucțiuni. Totuşi, cu puțin noroc, după cum vom vedea în acest capitol, una dintre caracteristicile principale ale teoriei corzilor ar putea primi confirmarea experimentală în următorii zece ani. Iar dacă șansa ne va surâde și mai mult, și alte amprente indirecte ale teoriei îşi pot găsi oricând confirmarea.

Foc încrucișat

Este oare corectă teoria corzilor? Nu ştim. Dacă eşti de acord cu cei care consideră că legile fizicii nu trebuie împărțite în legi care guvernează obiectele mari și legi care guvernează obiectele mici, şi dacă crezi că trebuie găsită o teorie fără limite de aplicabilitate, atunci teoria corzilor este singura care îndeplineşte condițiile. Am putea spune că această afirmație subliniază doar lipsa de imaginație a fizicienilor, și nu unicitatea fundamentală a teoriei corzilor. Poate că aşa e. Am mai putea aduce obiecția că, la fel cum un om își caută cheile pierdute doar în zona luminată de felinarul de pe stradă, şi fizicienii sunt strânşi cu toții în jurul teoriei corzilor deoarece istoria științei a aruncat din întâmplare o rază de lumină în această direcție. E posibil. Şi, dacă

ești mai conservator sau îți place rolul de avocat al diavolului, ai putea chiar afirma că fizicienii n-ar trebui să-și piardă vremea cu o teorie care postulează o nouă trăsătură a naturii care este de o sută de milioane de miliarde de ori mai mică decât orice poate fi actualmente sondat experimental.

Dacă ai fi emis aceste obiecții pe la sfârșitul anilor 1980, pe când teoria corzilor abia se lansa, te-ai fi alăturat celor mai respectați fizicieni ai timpului. De exemplu, la mijlocul anilor 1980, Sheldon Glasgow, fizician la Harvard și laureat al premiului Nobel, și Paul Ginsparg, fizician pe atunci tot la Harvard, au denunțat public lipsa de accesibilitate experimentală a teoriei:

> În locul tradiționalei confruntări dintre teorie și experiment, teoreticienii supercorzilor sunt în căutarea armoniei interne, în cadrul căreia eleganța, unicitatea și frumusețea definesc adevărul. Existența teoriei depinde de coincidențe magice, anulări miraculoase și legături între domenii ale matematicii aparent independente (și poate încă nedescoperite). Pot constitui oare aceste proprietăți un motiv de a accepta existența supercorzilor? Oare matematica și estetica pot înlocui și transcende simplul experiment?[70]

Cu altă ocazie, Glashow a mai spus:

> Teoria supercorzilor e atât de ambițioasă, încât este ori total corectă, ori total greșită. Singura problemă e că matematica folosită e atât de nouă, încât nu vom ști cum stau lucrurile decât peste decenii.[71]

El a pus în discuție și dacă teoreticienii corzilor „ar trebui în continuare să fie plătiți de departamentele de fizică și lăsați să inducă în eroare studenții impresionabili", avertizând că teoria corzilor subminează știința, aproape la fel cum o făcuse și teologia medievală cu secole în urmă.[72]

Cu puțin înainte de a muri, Richard Feynman declara că nu crede că teoria corzilor este *singura* soluție a problemelor – în particular, infiniții nedoriți –, optând mai curând pentru o fuziune armonioasă între gravitație și mecanica cuantică:

> Am impresia – dar poate mă înșel – că există mai multe căi de abordare a problemei. Nu cred că există o singură cale de a scăpa de infinități. Faptul că o teorie ne scapă de infiniți nu e un motiv suficient pentru a o considera unică.[73]

Şi Howard Georgi, eminentul coleg şi colaborator de la Harvard al lui Glashow, era un critic hotărât al teoriei corzilor la sfârşitul anilor 1980:

> Dacă ne vom lăsa ademeniţi de cântecele de sirenă despre „marea" unificare la distanţe atât de mici, încât prietenii noştri experimentatori nu ne mai pot ajuta, atunci vom avea probleme, pentru că vom pierde procesul crucial de eliminare a ideilor irelevante, proces care deosebeşte fizica de alte activităţi umane interesante.[74]

Ca în cazul multor subiecte de mare importanţă, pentru fiecare dintre aceşti critici apare şi un susţinător entuziast. Witten mărturisea că atunci când a aflat de modul în care teoria corzilor încorporează gravitaţia şi mecanica cuantică a trăit „cel mai mare extaz intelectual" al vieţii sale.[75] Cumrun Vafa, unul dintre teoreticienii de frunte ai teoriei corzilor de la Universitatea Harvard, spunea că „teoria corzilor ne dezvăluie, într-adevăr, cele mai profunde înţelesuri ale universului."[76] Murray Gell-Mann, laureat al premiului Nobel, spunea că teoria corzilor este „un lucru fantastic", iar el se aştepta ca o versiune a acestei teorii să fie într-o bună zi teoria întregii lumi.[77]

După cum se vede, dezbaterea e alimentată de fizică, dar şi de anumite perspective asupra felului în care fizica trebuie făcută. „Tradiţionaliştii" vor ca studiile teoretice să fie în strânsă legătură cu observaţiile experimentale, conformându-se aceloraşi tipare folosite cu succes în ultimele secole. Ceilalţi însă cred că suntem pregătiţi să abordăm probleme care se află dincolo de capacitatea noastră tehnologică actuală de testare directă.

În ciuda diferitelor perspective, în ultimul deceniu, criticile împotriva teoriei corzilor s-au temperat. Glashow găseşte două explicaţii. Mai întâi, spune el, pe la mijlocul anilor 1980:

> Teoreticienii anunţau cu entuziasm şi exuberanţă că în curând vor răspunde la toate întrebările fizicii. Cum în momentul de faţă entuziasmul lor este mult mai prudent, şi criticile mele din anii 1980 sunt mai puţin relevante.[78]

În al doilea rând subliniază că:

> Noi, teoreticienii care nu ne ocupăm de teoria corzilor, nu am progresat deloc în ultimul deceniu. Deci faptul că teoria corzilor este

> singurul subiect fierbinte la ora actuală este un argument puternic. Există întrebări la care nu se va putea răspunde în cadrul convențional al teoriei cuantice de câmp. Asta e deja limpede. Ele și-ar putea găsi răspunsul pe altă cale, iar singura cale alternativă pe care o cunosc este teoria corzilor.[79]

Aceeași perspectivă asupra anilor 1980 o are și Georgi:

> S-a supralicitat în cazul teoriei corzilor cu diverse ocazii, la începuturile ei. În anii care au urmat însă, am descoperit că unele dintre ideile teoriei corzilor au dus la moduri interesante de gândire, care mi-au fost și mie de folos în munca mea. Acum mă bucur să văd oameni dăruindu-și timpul acestei teorii a corzilor, fiindcă îmi dau seama că va conduce la descoperiri folositoare.[80]

Teoreticianul David Gross, figură marcantă atât a fizicii convenționale, cât și a teoriei corzilor, prezintă foarte elocvent situația:

> Se obișnuia ca, atunci când escaladam muntele naturii, experimentatorii să deschidă drumul. Noi, teoreticienii leneși, rămâneam în urmă. Din când în când dădeau jos câte un bolovan experimental care ricoșa în capetele noastre. Înțelegeam în fine care era ideea de bază și urmam calea deschisă de experimentatori. Când îi ajungeam din urmă, le explicam ce semnificație avea priveliștea și cum ajunseseră la ea. Acesta a fost modul vechi și simplu (cel puțin pentru teoreticieni) de a urca muntele. Ducem cu toții dorul acelor zile. Dar acum s-ar putea să fie nevoie ca noi, teoreticienii, să preluăm conducerea. Este o întreprindere solitară.[81]

Teoreticienii corzilor nu-și doresc o ascensiune solitară spre piscurile Muntelui Naturii; dimpotrivă, și-ar dori să împartă bucuriile și greutățile cu colegii lor experimentatori. Este vorba doar de un nefericit concurs de împrejurări, datorat discrepanțelor tehnologice, care a dus la actuala situație – o lipsă de sincronizare istorică – în care funiile și crampoanele teoretice, necesare ultimei părți a ascensiunii spre vârf, au fost parțial create, spre deosebire de cele experimentale care nu există încă. Dar asta *nu* înseamnă că teoria corzilor este fundamental ruptă de experiment, ci mai curând că teoreticienii corzilor speră „să disloce o piatră *teoretică*" de pe vârful de energie ultraînaltă al muntelui și s-o aducă experimentatorilor care lucrează în tabăra de mai

jos. Acesta este unul din obiectivele principale ale actualei cercetări în cadrul teoriei corzilor. Deocamdată nici o piatră nu a fost dislocată din vârf pentru a fi aruncată jos, dar poate chiar în aceste momente câteva pietricele fascinante și promițătoare își încep coborârea mult așteptată.

Calea spre experiment

Fără o descoperire tehnologică epocală nu vom fi niciodată în stare să atingem o scară de dimensiuni suficient de mică pentru a vedea direct o coardă. Fizicienii pot sonda materia până la o scară de o miliardime de miliardime de metru cu ajutorul acceleratoarelor care au dimensiuni de câteva mile. Pentru a cerceta distanțe mai mici e nevoie de energii mai mari, care necesită și instalații mai mari, capabile să-și concentreze întreaga energie asupra unei singure particule. Cum lungimea Planck este cu aproximativ 17 ordine de mărime mai mică decât dimensiunea pe care o putem cerceta la ora actuală, folosind tehnologia din ziua de azi, ne-ar fi necesar un accelerator de dimensiunea unei *galaxii* pentru a vedea corzile individuale. De fapt, Shmuel Nussinov de la Universitatea din Tel Aviv a demonstrat că această estimare aproximativă este mult prea optimistă; calcule mai realiste efectuate de el indică necesitatea unui accelerator de dimensiunea întregului *univers*. (Energia necesară pentru a cerceta materia la lungimi Planck este aproximativ egală cu o mie de kilowați-oră – energia necesară pentru funcționarea unui aparat de aer condiționat timp de o sută de ore. Problema tehnologică ce pare insurmontabilă este de a concentra toată această energie asupra unei singure particule, adică asupra unei singure corzi.) Cum Statele Unite au anulat până la urmă finanțarea pentru Superconducting Supercollider (Superacceleratorul Supraconductor) – un accelerator cu o circumferință „doar“ de 54 de mile – nu ar trebui să așteptați cu respirația tăiată bani pentru un accelerator care să sondeze scara Planck. Dacă vom testa deci experimental teoria corzilor, va trebui s-o facem în mod indirect. Va trebui să găsim consecințe ale teoriei corzilor în proprietăți fizice observabile la scări de lungime cu mult mai mari decât mărimea corzii.[82]

În lucrarea lor de importanță istorică, Candelas, Horowitz, Strominger și Witten au făcut primii pași spre acest obiectiv. Nu numai

că au descoperit că dimensiunile suplimentare ale teoriei corzilor trebuie să fie încolăcite în forme Calabi-Yau, dar au aflat şi unele dintre consecinţele pe care acest lucru le are asupra modurilor posibile de vibraţie ale corzii. Unul dintre rezultate e un exemplu uimitor pentru soluţiile neaşteptate pe care teoria corzilor le oferă vechilor probleme din fizica particulelor.

Să ne amintim că particulele elementare descoperite de fizicieni se încadrează în cele trei familii cu organizare identică, particulele fiecărei familii succesive fiind din ce în ce mai masive. Întrebarea pentru care nu a existat nici un răspuns înainte de teoria corzilor era „de ce sunt *familii*" şi „de ce sunt *trei*"? Iată ce propune teoria corzilor. Formele tipice Calabi-Yau conţin *găuri* care sunt asemănătoare celor dintr-un covrig sau dintr-un „covrig multiplu", după cum se vede în figura 9.1. În contextul Calabi-Yau multidimensional, există de fapt o mulţime de tipuri de găuri care pot apărea – găuri care ele însele pot avea diferite dimensiuni („găuri multidimensionale") – însă figura 9.1 sugerează doar ideea de bază. Candelas, Horowitz, Strominger şi Witten au examinat cu atentie efectul pe care aceste găuri îl are asupra modurilor posibile de vibraţie ale corzii, şi iată ce au descoperit.

Există o *familie* de vibraţii ale corzii de cea mai mică energie asociată fiecărei *găuri* în porţiunea Calabi-Yau a spaţiului. Datorită faptului că particulele elementare cunoscute ar trebui să corespundă modurilor de oscilaţie cu cea mai mică energie, existenţa găurilor multiple – asemănătoare celor din covrigul multiplu – arată că aceste moduri de vibraţie ale corzii se vor încadra în familii multiple. Dacă spaţiul Calabi-Yau încolăcit are trei găuri, atunci vom regăsi trei familii de particule elementare.[83] Astfel, teoria corzilor susţine că organizarea

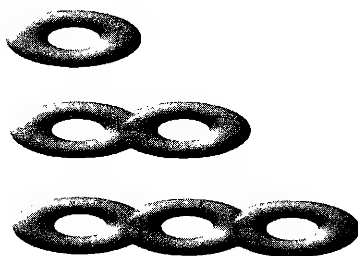


Figura 9.1 Un covrig, sau tor, şi rudele sale multiple (cu mai multe găuri).

în familii observată experimental nu este o caracteristică inexplicabilă, întâmplătoare sau de origine divină, ci o reflectare a numărului de găuri ale formelor geometrice ce constituie dimensiunile suplimentare! Acest gen de rezultat îi dă palpitații unui fizician.

Ați putea crede că numărul de găuri ale dimensiunilor încolăcite la scara Planck – fizică din vârful muntelui, prin excelență – a lovit acum o piatră testabilă experimental, care s-a rostogolit spre tabăra energiilor accesibile. Astfel, experimentatorii pot determina – de fapt, au determinat deja – numărul familiilor de particule: 3. Din nefericire, numărul de găuri conținut în fiecare din cele zece mii de forme Calabi-Yau cunoscute variază într-un interval mare. Unele au 3. Dar altele au 4, 5, 25 și așa mai departe – există unele care au chiar 480 de găuri. *Problema este că deocamdată nimeni nu știe cum să deducă din ecuațiile teoriei corzilor care dintre formele Calabi-Yau constituie dimensiunile spațiale suplimentare.* Dacă am descoperi principiul care ne permite să selectăm o formă Calabi-Yau din numeroasele posibilități, atunci într-adevăr o piatră din vârful muntelui s-ar desprinde și s-ar rostogoli jos, în tabăra experimentatorilor. Dacă acea formă Calabi-Yau determinată de ecuațiile teoriei ar avea trei găuri, am confirma o „postdicție" importantă a teoriei corzilor care explică o caracteristică cunoscută a lumii, altminteri absolut misterioasă. Dar găsirea principiului de selectare a formelor Calabi-Yau este deocamdată o problemă nerezolvată. Totuși – și acesta e un lucru important – se vede că teoria corzilor oferă potențialul de a răspunde nedumeririlor fundamentale ale fizicii particulelor, iar acest lucru în sine e un progres important.

Numărul de familii este doar o consecință experimentală a formei geometrice a dimensiunilor suplimentare. Prin efectul lor asupra modurilor posibile de vibrație ale corzilor, între alte consecințe ale dimensiunilor suplimentare se numără și proprietățile detaliate ale forțelor și particulelor de materie. Un exemplu: cercetările lui Strominger și Witten arată că masele particulelor din fiecare familie depind de – atenție, e puțin cam complicat – modul în care frontierele diverselor găuri multidimensionale din formele Calabi-Yau se intersectează și se întrepătrund. Este greu de vizualizat, dar ideea e că din moment ce o coardă vibrează prin dimensiunile suplimentare încolăcite, aranjamentul precis al diverselor găuri și modul în care forma Calabi-Yau se înfășoară în jurul lor au un impact direct asupra modurilor posibile

de vibrație rezonantă. Detaliile devin greu de urmărit și nu sunt chiar esențiale, însă important e faptul că, în ceea ce privește numărul de familii, teoria corzilor ne poate oferi cadrul pentru a răspunde la întrebări – cum ar fi: de ce electronul și celelalte particule au masele pe care le au? – la care alte teorii nu pot da nici un răspuns. Și, din nou, pentru a efectua asemenea calcule e necesar să știm ce formă Calabi-Yau să alegem pentru dimensiunile suplimentare.

Discuția precedentă ne-a făcut să înțelegem cum va putea explica într-o bună zi teoria corzilor proprietățile particulelor de materie înscrise în tabelul 1.1. Teoreticienii corzilor cred că o poveste similară va explica și proprietățile particulelor mesager ale forțelor fundamentale din tabelul 1.2. În timp ce corzile se răsucesc și vibrează șerpuind prin dimensiunile extinse și prin cele încolăcite, o mică parte a vastului lor repertoriu de oscilație constă în vibrații cu spin egal cu 1 sau 2. Acestea ar putea fi stările vibraționale care transportă forța între particule. Indiferent de forma spațiului Calabi-Yau, există întotdeauna un mod de vibrație cu masă zero și cu spin 2; identificăm acest mod de vibrație cu gravitonul. Lista precisă a particulelor mesager de spin 1 – numărul lor, tăria forței pe care o transmit, simetriile de etalonare cărora li se conformează – depinde însă în mod critic de forma geometrică precisă a dimensiunilor încolăcite. Ajungem deci la aceeași concluzie: teoria corzilor oferă cadrul pentru explicarea conținutului de particule mesager din universul nostru, adică pentru explicarea proprietăților forțelor fundamentale, dar, dacă nu știm exact în ce formă Calabi-Yau sunt încolăcite dimensiunile suplimentare, nu putem face nici o predicție sau postdicție precisă (dincolo de remarca lui Witten privind postdicția gravitației).

De ce nu ne putem da seama care este forma „corectă" Calabi-Yau"? Majoritatea teoreticienilor dau vina pe inadecvarea uneltelor teoretice care se folosesc deocamdată pentru analiza teoriei corzilor. Așa cum vom vedea în capitolul 12, cadrul matematic al teoriei corzilor este atât de complicat, încât fizicienii nu au putut face decât calcule aproximative folosind un formalism numit *teoria perturbațiilor*. În această schemă de aproximări, fiecare formă Calabi-Yau posibilă se află pe picior de egalitate cu toate celelalte; nici una nu e în mod fundamental evidențiată de ecuații. Cum consecințele fizice ale teoriei corzilor depind critic de forma precisă a dimensiunilor încolăcite, fără posibilitatea de a selecta o anume formă Calabi-Yau dintre toate celelalte nu se

poate trage nici o concluzie definitivă care să fie testată experimental. Țelul actualelor cercetări este de a elabora metode teoretice care să depășească aceste abordări aproximative, în speranța că, pe lângă alte beneficii, vom ajunge la acea formă Calabi-Yau unică a dimensiunilor suplimentare. Vom vorbi despre progresul în acest domeniu în capitolul 13.

Epuizarea posibilităților

V-ați putea pune întrebarea: chiar dacă nu ne putem da seama ce formă Calabi-Yau va fi selectată de teoria corzilor, există oare vreo opțiune care să conducă la proprietăți fizice compatibile cu ceea ce observăm? Cu alte cuvinte, dacă ar fi să stabilim proprietățile fizice asociate fiecărei forme Calabi-Yau posibile și să le adunăm într-un catalog uriaș, am găsi oare vreuna care să se potrivească cu realitatea? Este o întrebare importantă, la care e dificil de dat un răspuns din două motive.

Un punct de pornire rezonabil ar fi să ne concentrăm doar asupra formelor Calabi-Yau care produc cele trei familii. Astfel se scurtează considerabil lista opțiunilor viabile, dar rămân oricum destul de multe. De fapt, se observă că putem deforma un covrig cu mai multe inele de o anumită formă, transformându-l într-o mulțime de alte forme – o varietate practic infinită – fără să modificăm numărul găurilor pe care le conține. În figura 9.2 ilustrăm o asemenea deformare a ultimului exemplu din figura 9.1. Cam în același mod putem să începem cu un spațiu Calabi-Yau cu trei găuri și să-l deformăm fără a-i schimba numărul de găuri, rezultând un număr infinit de variante ale formelor. (Când am menționat anterior că există zeci de mii de forme Calabi-Yau,

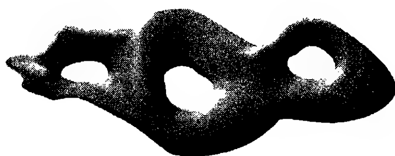


Figura 9.2 Forma de covrig multiplu poate fi deformată în multe feluri, fără a se produce vreo schimbare a numărului de găuri pe care le conține, una dintre variante fiind cea ilustrată aici.

grupasem deja formele care se pot transforma una într-alta prin asemenea deformări, considerând întregul grup ca fiind un singur spațiu Calabi-Yau.) Problema este că proprietățile fizice detaliate ale vibrațiilor corzii, masele lor și reacția lor la forțe *sunt* puternic afectate de asemenea schimbări fine ale formelor și, după cum am mai spus, nu avem nici un mijloc de a alege o variantă în detrimentul alteia. Oricât de mulți doctoranzi ar pune la muncă profesorii, este pur și simplu imposibil să găsești acea fizică ce corespunde unei liste infinite de forme diferite.

Această constatare i-a făcut pe teoreticienii corzilor să examineze fizica rezultând dintr-un eșantion al posibilelor forme Calabi-Yau. Chiar și așa lucrurile nu au fost deloc ușoare. Ecuațiile aproximative folosite în mod curent în teoria corzilor nu sunt destul de eficiente pentru a obține în întregime fizica ce rezultă dintr-o anumită alegere a formei Calabi-Yau. Ele ne pot duce departe pe drumul înțelegerii, în sensul estimării grosiere a proprietăților vibrațiilor corzilor care sperăm să corespundă particulelor observate. Dar concluzii fizice precise și definitive, cum ar fi masa electronului sau tăria forței slabe, necesită ecuații mult mai exacte decât cele ale actualului cadru aproximativ. Să ne aducem aminte din capitolul 6 – din exemplul cu *Prețul corect* – că scara de energie „naturală“ a teoriei corzilor este energia Planck și că numai prin anulări extrem de fine rezultă din teoria corzilor moduri de vibrație cu mase aflate în vecinătatea celor ale particulelor de materie și de forță cunoscute. Aceste anulări foarte fine necesită calcule foarte precise, pentru că erori oricât de mici pot avea un impact imens asupra acurateței. După cum vom vedea în capitolul 12, pe la mijlocul anilor 1990, fizicienii au făcut progrese semnificative în depășirea actualelor ecuații aproximative, dar drumul e lung.

Unde ne aflăm în prezent? Ei bine, chiar dacă nu avem un criteriu fundamental prin care să alegem o anume formă Calabi-Yau din toate celelalte și nu dispunem de toate uneltele teoretice necesare pentru a obține fără rest consecințele observabile ale unei asemenea alegeri, tot ne putem întreba dacă *vreuna* dintre alegerile din catalogul Calabi-Yau ne va conduce la o lume care să fie chiar și într-un acord aproximativ cu observațiile. Răspunsul la această întrebare este încurajator. Deși majoritatea articolelor din catalogul Calabi-Yau produc consecințe observabile care diferă flagrant de ceea ce cunoaștem în lumea noastră (număr diferit de familii de particule, număr și tipuri diferite

de forțe fundamentale etc.), câteva articole din catalog conduc la o fizică destul de asemănătoare cu realitatea. Ceea ce înseamnă că *există* exemple de spații Calabi-Yau care, dacă sunt alese pentru dimensiunile încolăcite necesare teoriei corzilor, dau naștere la vibrații ale corzilor care sunt înrudite îndeaproape cu particulele modelului standard. Și, lucru extrem de important, teoria corzilor include cu succes forța gravitațională în acest cadru cuantic.

Cu actualul nivel de înțelegere, această situație este dintre cele mai bune la care puteam spera. Dacă o mulțime de spații Calabi-Yau ar fi fost cât de cât în acord cu experimentul, legătura dintre o anume alegere și proprietățile fizice observate ar fi mai puțin captivantă. Multe alegeri s-ar potrivi, deci nici una nu ar fi scoasă în evidență, chiar și din perspectiva experimentală. Pe de altă parte, dacă nici una dintre formele Calabi-Yau nu ar duce la ceva care să semene cât de cât cu proprietățile fizice observate, atunci teoria corzilor ar fi un cadru teoretic frumos, dar fără relevanță pentru universul nostru. Identificarea unui număr mic de forme Calabi-Yau ce par a se încadra în limite acceptabile este un rezultat extrem de încurajator.

Una dintre cele mai mari realizări științifice – dacă nu chiar cea mai mare – ar fi explicarea proprietăților particulelor elementare și ale forțelor. Ne-am putea întreba însă dacă se pot face predicții teoretice – nu postdicții – pe care experimentatorii să încerce să le confirme acum sau în viitorul apropiat. Răspunsul e da.

Superparticule

Actualele obstacole teoretice care împiedică teoria corzilor să facă predicții detaliate ne silesc să căutăm aspectele *generice* ale unui univers alcătuit din corzi, și nu cele specifice. În acest context, aspecte generice înseamnă trăsături atât de profunde ale teoriei corzilor, încât sunt puțin afectate, sau chiar independente, de acele proprietăți detaliate ale teoriei care se află deocamdată în afara orizontului nostru. Asemenea trăsături pot fi abordate cu destulă încredere, chiar dacă nu înțelegem pe deplin teoria. În capitolele ce urmează vom reveni cu alte exemple, dar acum ne vom ocupa în mod special de supersimetrie.

După cum am mai menționat, o proprietate fundamentală a teoriei corzilor este simetria extremă, care include nu numai principiile de

simetrie intuitivă, dar respectă şi extensia matematică maximă a acestor principii, supersimetria. Aceasta înseamnă, aşa cum am văzut în capitolul 7, că modurile de vibraţie ale corzii apar în perechi – perechile superpartener – diferind unul de altul prin jumătate de unitate de spin. Dacă teoria corzilor este corectă, atunci unele dintre vibraţiile corzilor vor corespunde particulelor elementare cunoscute. Datorită împerecherii supersimetrice, teoria corzilor *prezice* faptul că fiecare particulă cunoscută va avea un superpartener. Putem determina sarcinile de forţă pe care le va avea fiecare dintre aceşti superparteneri, dar deocamdată nu putem prezice şi masele lor. Chiar şi aşa, predicţia *existenţei* superpartenerilor este o trăsătură generică a teoriei corzilor; e o proprietate a teoriei corzilor care nu depinde de acele aspecte încă nelămurite.

Deocamdată nu au fost observaţi superparteneri ai particulelor elementare cunoscute. Asta ar putea însemna că ei nu există, iar teoria corzilor e greşită. Mulţi fizicieni din teoria particulelor cred însă că aceştia sunt foarte grei şi nu pot fi observaţi experimental prin metodele curente. În momentul de faţă fizicienii construiesc în Elveţia, la Geneva, un accelerator mamut numit Large Hadron Colider. Există speranţe mari ca acesta să fie suficient de puternic pentru a face posibilă observarea particulelor superpartener. Acceleratorul ar trebui să fie pus în funcţiune înainte de 2010 şi la scurt timp supersimetria ar putea fi confirmată experimental. „Supersimetria ar trebui să fie în curând descoperită. Atunci va fi un moment spectaculos" – spunea Schwartz.[84]

Trebuie totuşi făcute două remarci. Chiar dacă vom descoperi particulele superpartener, de unul singur acest fapt nu va putea confirma valabilitatea teoriei corzilor. După cum am văzut, deşi supersimetria a fost descoperită prin intermediul teoriei corzilor, ea a fost inclusă cu uşurinţă în teoriile particulelor punctiforme, deci originea ei nu ţine neapărat de teoria corzilor. Şi invers, chiar dacă particulele superpartener nu vor fi descoperite cu ajutorul acceleratorului Large Hadron Colider, acest fapt de unul singur nu va elimina teoria corzilor, căci s-ar putea ca superpartenerii să fie atât de grei, încât nici noul accelerator să nu-i poată detecta.

Dacă totuşi particulele superpartener vor fi observate, aceasta va constitui o dovadă puternică şi încurajatoare în favoarea teoriei corzilor.

Particule cu sarcină fracționară

O altă amprentă experimentală a teoriei corzilor, legată de sarcina electrică, nu are același caracter generic, dar e la fel de spectaculoasă. Particulele elementare din modelul standard au o plajă limitată de sarcini electrice. Cuarcii și anticuarcii au sarcini electrice de o treime sau două treimi, cu plus sau cu minus, iar celelalte particule au sarcina zero, unu sau minus unu. Combinații ale acestor particule alcătuiesc materia cunoscută din univers. În teoria corzilor e însă posibil să existe moduri rezonante de vibrație care să corespundă unor particule cu sarcini electrice mult diferite. De exemplu, sarcina electrică a unei particule poate lua valori fracționale exotice, precum 1/5, 1/11, 1/13, 1/53 și altele dintr-o gamă largă de posibilități. Aceste sarcini neobișnuite pot apărea când dimensiunile curbate au o anumită proprietate geometrică: găuri având proprietatea că acele corzi care le înconjoară se pot desface doar răsucindu-le de un număr dat de ori.[85] Detaliile nu sunt foarte importante, dar se pare că numărul de răsuciri necesare pentru a le „descurca" se manifestă în modurile de vibrație permise, determinând numitorul sarcinii fracționale.

Unele forme Calabi-Yau au această proprietate, altele nu, și de aceea posibilitatea unor sarcini electrice cu valoare fracționară neobișnuită nu are caracterul generic al existenței superparticulelor. Pe de altă parte, dacă predicția existenței superpartenerilor nu este o proprietate unică a teoriei corzilor, decenii de cercetări au demonstrat că nu există nici un motiv ca asemenea sarcini electrice fracționare să existe în *vreo* teorie a particulelor punctiforme. Ele ar putea fi introduse forțat într-o teorie a particulelor punctiforme, dar ar fi cu totul nefiresc. Posibila lor apariție datorată proprietăților geometrice simple ale dimensiunilor suplimentare face ca aceste sarcini electrice neobișnuite să devină o amprentă experimentală naturală pentru teoria corzilor.

La fel ca în cazul situației superpartenerilor, nu au fost niciodată observate particule cu sarcini atât de „exotice", iar cunoștințele noastre despre teoria corzilor nu ne permit să prezicem masele lor, chiar dacă dimensiunile suplimentare ar avea proprietățile potrivite pentru a le genera. O explicație a faptului că nu au fost încă văzute ar fi din nou că, dacă există, masele lor sunt prea mari pentru a fi detectate experimental – este foarte probabil ca masele să fie de ordinul masei Planck. Dacă însă într-un experiment viitor vor fi descoperite asemenea sar-

cini electrice exotice, atunci vom obţine o dovadă serioasă în favoarea teoriei corzilor.

Posibilităţi mai îndepărtate

Există şi alte căi prin care putem obţine dovezi favorabile teoriei corzilor. De exemplu, Witten a indicat posibilitatea ca în viitor astronomii să găsească un semn direct al teoriei corzilor în datele pe care le adună prin observarea spaţiului. După cum am văzut în capitolul 6, mărimea tipică a unei corzi este lungimea Planck, dar corzile cu mai multă energie pot fi mult mai mari. De fapt, energia produsă de big bang ar fi fost suficientă pentru a produce câteva corzi de mărimi macroscopice care, prin expansiunea cosmică, ar fi putut ajunge la mărimi astronomice. Ne putem imagina că acum, sau cândva în viitor, o asemenea coardă să măture cerul nopţii, lăsând o amprentă inconfundabilă în datele pe care le adună astronomii (de pildă, o mică schimbare în temperatura radiaţiei cosmice de fond; vezi capitolul 14). După cum spunea Witten, „deşi puţin cam pretenţios, acesta este scenariul meu favorit pentru confirmarea teoriei corzilor, căci nimic nu ar constitui o dovadă mai grăitoare decât să vezi cu telescopul o coardă.“[86]

Există şi alte posibile amprente experimentale, mai realiste, ale teoriei corzilor. Iată cinci exemple. Mai întâi, în legătură cu tabelul 1.1 am arătat că nu se ştie exact dacă neutrinul este foarte uşor sau pur şi simplu are masă nulă. Conform modelului standard, nu are masă, dar nu există nici un motiv profund. O provocare pentru teoria corzilor este să explice datele actuale şi viitoare legate de neutrini, în special dacă experimentele vor demonstra în final că au o masă foarte mică, dar diferită de zero. În al doilea rând, există anumite procese ipotetice interzise de modelul standard, dar permise în teoria corzilor. Între acestea se numără şi posibila dezintegrare a protonului (nu vă faceţi griji, dacă o asemenea dezintegrare există, ea are loc foarte încet), şi posibilele transformări şi dezintegrări ale diverselor combinaţii de cuarci, care intră în contradicţie cu anumite proprietăţi bine stabilite ale teoriei cuantice de câmp a particulelor punctiforme.[87] Asemenea procese sunt în mod special interesante datorită inexistenţei lor în teoria convenţională, fapt care le transformă în senzori foarte

sensibili pentru o fizică de neimaginat fără postularea unor noi principii teoretice. Dacă ar fi observate experimental, astfel de procese ar oferi un teren fertil teoriei corzilor pentru a le explica. În al treilea rând, pentru anumite forme Calabi-Yau există moduri de vibrație particulare ale corzilor ce pot genera efectiv noi și minuscule câmpuri de forță cu rază lungă de acțiune. Dacă s-ar descoperi efectele unor asemenea noi forțe, ele ar reflecta noua fizică a teoriei corzilor. În al patrulea rând, așa cum vom vedea în următorul capitol, astronomii au strâns dovezi că galaxia noastră și poate întregul univers sunt scufundate într-o baie de *materie întunecată*, a cărei natură nu a fost încă identificată. Prin numeroasele sale moduri rezonante de vibrație posibile, teoria corzilor ne sugerează câțiva candidați pentru „materia întunecată"; verdictul va trebui să aștepte alte rezultate experimentale care vor stabili în detaliu proprietățile materiei întunecate.

A cincea și ultima modalitate de a lega teoria corzilor de observație se referă la constanta cosmologică – să ne amintim, așa cum am arătat în capitolul 3, aceasta este o modificare pe care Einstein a impus-o temporar asupra ecuațiilor sale inițiale ale relativității generale pentru a obține un univers static. Deși descoperirea ulterioară a faptului că universul se dilată l-a făcut pe Einstein să-și retragă modificarea, fizicienii și-au dat seama că nu există nici un motiv pentru care valoarea constantei cosmologice trebuie să fie zero. De fapt, constanta cosmologică poate fi interpretată ca un fel de energie atotcuprinzătoare depozitată în vidul spațial, deci valoarea ei ar trebui să fie calculabilă teoretic și măsurabilă experimental. Dar până acum între observații și calcule au apărut nepotriviri flagrante: observațiile arată că această constantă cosmologică este fie nulă (așa cum sugerase Einstein), fie foarte mică; calculele indică faptul că fluctuațiile cuantice din vidul spațial tind să *genereze* o constantă cosmologică diferită de zero a cărei valoare este cu 120 de ordine de mărime (1 urmat de 120 de zerouri) mai mare decât permite experimentul! Aceasta reprezintă o minunată provocare pentru teoreticienii corzilor. Pot oare calculele din teoria corzilor înlătura această nepotrivire explicând de ce constanta cosmologică este zero sau, dacă experimentele stabilesc că valoarea ei este mică dar nenulă, poate oferi teoria corzilor o explicație? Dacă teoria corzilor va putea răspunde la această provocare – ceea ce deocamdată nu s-a întâmplat – ar apărea o dovadă importantă în favoarea ei.

O evaluare

Istoria fizicii este plină de ideei care, atunci când au fost prima dată expuse, păreau de netestat, însă cu timpul, grație progresului tehnologic, au intrat în domeniul testabilității experimentale. Ideea că materia este alcătuită din atomi, ipoteza lui Pauli privind existența unor particule fantomatice numite neutrini și presupunerea că cerul este împânzit de stele neutronice și găuri negre sunt doar trei dintre cele mai proeminente idei de acest gen, idei pe care acum le îmbrățișăm și le folosim, dar care inițial păreau mai curând literatură științifico-fantastică decât știință.

Justificarea introducerii teoriei corzilor este cel puțin la fel de atrăgătoare ca oricare dintre aceste trei idei – de fapt, teoria corzilor a fost considerată cea mai importantă și mai tulburătoare înfăptuire a fizicii teoretice de la descoperirea mecanicii cuantice. Această comparație e cât se poate de nimerită, pentru că istoria mecanicii cuantice ne învață că trebuie să treacă mai multe decenii până când revoluțiile din fizică ajung la maturitate. În plus, teoreticienii de atunci ai mecanicii cuantice aveau un mare avantaj față de cei care se ocupă azi de teoria corzilor: mecanica cuantică, chiar și parțial formulată, avea contact direct cu rezultatele experimentale. Dar și așa a durat aproape 30 de ani elaborarea structurii logice a mecanicii cuantice și încă aproximativ 20 încorporarea deplină a relativității speciale în teorie. Acum se încearcă încorporarea relativității generale, o sarcină mult mai grea, iar contactul cu experimentul e mult mai dificil. Spre deosebire de cei care au rezolvat problema mecanicii cuantice, teoreticienii de azi ai corzilor nu sunt călăuziți pas cu pas de lumina naturală a rezultatelor experimentale.

Ne putem prin urmare aștepta ca una sau mai multe generații de fizicieni să-și dedice viața cercetării și dezvoltării teoriei corzilor fără ca vreun rezultat experimental să le vină în ajutor. Numeroșii fizicieni din lumea întreagă care lucrează în domeniul teoriei corzilor știu foarte bine că își asumă riscul de a nu obține nici un rezultat concludent după o viață întreagă de eforturi. Teoria va avansa mult, dar va fi oare suficient pentru a depăși actualele obstacole și a conduce la previziuni testabile experimental? Testele indirecte despre care am vorbit vor duce oare la acele rezultate și confirmări pe care le așteaptă toată lumea? Aceste întrebări îi frământă pe toți cei care lucrează în teoria

corzilor, însă ele nu au deocamdată vreun răspuns. Doar timpul va decide. Frumusețea simplității teoriei corzilor, felul în care împacă gravitația și mecanica cuantică, posibilitatea de a unifica toate elementele naturii și potențialul ei practic nelimitat de a face predicții, toate acestea îi îndeamnă pe fizicieni să-și asume riscul.

Aceste considerații dătătoare de speranțe au fost continuu susținute de capacitatea teoriei corzilor de a descoperi noi caracteristici fizice remarcabile ale unui univers bazat pe corzi, caracteristici ce dezvăluie coerența subtilă și profundă din funcționarea naturii. În limbajul introdus anterior, multe dintre ele sunt caracteristici generice care, indiferent de detaliile ce ne lipsesc pentru moment, vor constitui proprietățile de bază ale unui univers alcătuit din corzi. Cele mai surprinzătoare dintre ele au avut un efect profund asupra felului în care înțelegem spațiul și timpul.

Partea a IV-a

Teoria corzilor și textura spațio-temporală

CAPITOLUL 10

Geometria cuantică

În cursul unui deceniu, Einstein a reuşit de unul singur să înlocuiască vechea perspectivă newtoniană cu o nouă şi profundă înţelegere a gravitaţiei. Nu a trecut mult până când deopotrivă experţi şi profani şi-au exprimat admiraţia faţă de felul strălucit şi original în care Einstein a făurit relativitatea generală. Nu trebuie să pierdem însă din vedere împrejurările istorice favorabile care au contribuit decisiv la succesul lui Einstein. Printre cele mai importante se numără descoperirile matematice din secolul XIX ale lui Georg Bernhard Riemann, care ofereau un aparat geometric precis pentru descrierea spaţiilor curbate de dimensiuni arbitrare. În faimoasa sa prelegere inaugurală din 1854 de la Universitatea din Göttingen, Riemann a rupt lanţurile ce limitau gândirea la un spaţiu plan, euclidian, şi a deschis drumul pentru tratarea matematică a geometriei în toate tipurile de suprafeţe curbate. Ideile lui Riemann au oferit matematicii posibilitatea de a analiza cantitativ spaţii curbate asemenea celor ilustrate în figurile 3.4 şi 3.6. Geniul lui Einstein s-a vădit în recunoaşterea acestui tip de matematică drept instrument ideal pentru introducerea noilor sale idei privind forţa gravitaţională.

Acum, la aproape un secol de la performanţa lui Einstein, teoria corzilor ne dă o descriere cuantică a gravitaţiei care, în chip necesar, modifică relativitatea generală atunci când distanţele implicate devin de ordinul de mărime al lungimii Planck. Geometria riemanniană este nucleul matematic al relativităţii generale, prin urmare şi ea trebuie modificată pentru a reflecta noua fizică a distanţelor scurte din teoria corzilor. Dacă relativitatea generală afirmă că proprietăţile curbate ale universului sunt descrise de geometria lui Riemann, teoria corzilor

ne spune că acest lucru este adevărat doar când examinăm textura universului la o scară suficient de mare. Pentru distanțe de ordinul lungimii Planck, e nevoie de un nou tip de geometrie, în concordanță cu noua fizică a teoriei corzilor. Acest nou cadru geometric se numește *geometrie cuantică*.

Spre deosebire de cazul geometriei riemanniene, teoreticienii corzilor nu au la dispoziție nici o lucrare de geometrie de pe raftul vreunui matematician pentru a o pune în slujba geometriei cuantice. În schimb, fizicienii și matematicienii studiază intens teoria corzilor, edificând treptat o nouă ramură a fizicii și matematicii. Deși povestea nu a ajuns la capăt, cercetările au dezvăluit deja multe proprietăți geometrice noi ale spațiu-timpului datorate teoriei corzilor, proprietăți care l-ar fi entuziasmat fără îndoială și pe Einstein.

Esența geometriei riemanniene

Când sari pe o trambulină elastică, greutatea corpului face ca ea să se deformeze prin întinderea fibrelor ei elastice. Această întindere e maximă chiar sub corpul tău și devine din ce în ce mai mică pe măsură ce te apropii de marginea trambulinei. Efectul se poate observa și mai bine dacă pe suprafața elastică e pictat chipul atât de cunoscut al Mona Lisei. Când trambulina nu e supusă nici unui efort, Mona Lisa arată normal. Dar când stai pe trambulină, imaginea Mona Lisei e distorsionată, în special în zona aflată sub corpul tău, așa cum se vede în figura 10.1.

Acest exemplu surprinde esența matematicii lui Riemann care descrie suprafețe curbate. Sprijinindu-se pe ideile anterioare ale matematicienilor Carl Friedrich Gauss, Nikolai Lobacevski și Jànos Bolyai, Riemann a demonstrat că o analiză atentă a *distanțelor* dintre toate punctele de pe sau dintr-un obiect face posibilă determinarea cantitativă a curbării. În esență se poate spune că, cu cât este mai puternică întinderea (neuniformă) – adică abaterea de la relațiile de distanță pentru o formă plată –, cu atât e mai mare curbarea obiectului. De exemplu, trambulina elastică e întinsă la maximum chiar sub corpul tău, deci relațiile de distanță dintre punctele din această zonă sunt deformate cel mai mult. Această regiune a trambulinei are deci curbura cea mai



Figura 10.1 Când stai pe trambulina elastică Mona Lisa, deformarea imaginii e maximă chiar sub tine.

mare, după cum ne aşteptam având în vedere că aici Mona Lisa e supusă celor mai mari distorsiuni, producând un fel de grimasă în locul enigmaticului ei zâmbet.

Einstein a adoptat descoperirile matematice ale lui Riemann, dându-le o interpretare fizică precisă. Așa cum am arătat în capitolul 3, curbarea spațiului-timp întruchipează forța gravitațională. Dar să analizăm această interpretare ceva mai atent. În sens matematic, curbarea spațiului-timp, ca şi curbarea trambulinei elastice, reflectă distorsionarea distanțelor dintre *punctele* lui. În sens fizic, forța gravitațională resimțită de un obiect este o reflectare directă a acestei distorsiuni. De fapt, micşorând treptat obiectul, matematica și fizica se contopesc și mai mult pe măsură ce ne apropiem de înțelegerea fizică a conceptului matematic abstract de punct. Teoria corzilor limitează însă precizia cu care formalismul matematic al lui Riemann poate fi întruchipat de fizica gravitației, deoarece există o limită până la care putem micșora un obiect. Când ajungi la distanțe de dimensiunea corzilor, nu poți merge mai departe. Noțiunea tradițională de particulă punctiformă nu există în teoria corzilor – elementul esențial grație căruia putem ajunge la o teorie cuantică a gravitației. Asta ne demonstrează clar că geometria riemanniană, întemeiată pe distanța dintre puncte, e modificată la scară ultramicroscopică de teoria corzilor.

Această observație are un efect foarte mic asupra aplicațiilor macroscopice obişnuite ale relativității generale. De exemplu, în studiile

cosmologice, fizicienii consideră galaxii întregi ca pe nişte puncte, fiindcă la scara universului dimensiunea lor e neglijabilă. Din acest motiv, folosirea geometriei lui Riemann într-un mod atât de direct se dovedeşte o aproximaţie foarte bună, după cum o dovedeşte succesul relativităţii generale în contextul cosmologic. În domeniul ultramicroscopic însă, natura extinsă a corzii face ca formalismul matematic al lui Riemann să nu mai poată fi aplicat. După cum vom vedea, el trebuie înlocuit de geometria cuantică a teoriei corzilor, cu proprietăţi noi şi surprinzătoare.

Teren de joacă în cosmologie

În conformitate cu modelul cosmologic al big bang-ului, întregul univers a apărut violent în urma unei explozii cosmice, în urmă cu aproximativ 15 miliarde de ani. După cum a descoperit Hubble, rămăşiţele acestei explozii, sub forma a miliarde de galaxii, continuă să se îndepărteze. Universul este în expansiune. Nu ştim dacă această expansiune cosmică va continua la nesfârşit sau va fi încetinită până la oprire, după care mişcarea se va inversa, ducând la o implozie cosmică. Astronomii şi astrofizicienii încearcă să lămurească această problemă pe cale experimentală, deoarece răspunsul este determinat de ceva ce în principiu poate fi măsurat: densitatea medie a materiei din univers.

Dacă densitatea medie a materiei depăşeşte o aşa-numită *densitate critică*, de aproximativ o sutime de miliardime de miliardime de miliardime (10^{-29}) de gram pe centimetru cub – aproximativ cinci atomi de hidrogen pentru fiecare metru cub de univers – atunci o forţă gravitaţională suficient de mare va străbate cosmosul şi îl va opri, pentru ca apoi să-i inverseze expansiunea. Dacă densitatea medie a materiei este mai mică decât această valoare critică, atracţia gravitaţională va fi prea slabă pentru a opri expansiunea, care va continua la nesfârşit. (Bazându-vă pe propriile observaţii asupra lumii, v-aţi putea gândi că densitatea medie depăşeşte de departe densitatea critică. Dar amintiţi-vă că materia, ca şi banii, tinde să se aglomereze. A folosi densitatea medie a materiei Pământului, sistemului solar sau chiar Căii Lactee ca indicator pentru întregul univers ar fi ca şi cum am considera averea lui Bill Gates ca medie a veniturilor. Aşa cum există mulţi oameni ale căror câştiguri sunt mult mai mici decât cele ale lui Bill Gates,

diminuând substanţial media, există foarte mult spaţiu aproape gol între galaxii care scade drastic densitatea medie totală a materiei.)

Studiind cu atenţie distribuţia galaxiilor în spaţiu, astronomii îşi pot face o idee destul de precisă asupra cantităţii medii de materie vizibilă din univers, iar ea este semnificativ mai mică decât valoarea critică. Există însă dovezi clare, atât teoretice, cât şi experimentale, că universul este îmbibat cu materie întunecată. Această materie nu participă la procesul de fuziune nucleară care alimentează stelele, şi deci nu emite lumină, fiind astfel invizibilă pentru telescoapele astronomilor. Nimeni nu a stabilit natura acestei materii întunecate, şi cu atât mai puţin cantitatea ei exactă. Prin urmare, soarta universului nostru, aflat în prezent în expansiune, este incertă.

Haideţi să presupunem însă că densitatea materiei depăşeşte valoarea critică şi că într-o zi din viitorul îndepărtat expansiunea se va opri, iar universul va suferi un colaps. Atunci, toate galaxiile vor începe să se apropie uşor una de alta, dar, cu timpul, viteza lor de apropiere va creşte enorm. Trebuie să ne imaginăm întregul univers restrângându-se într-o masă cosmică ce se micşorează continuu. După cum am arătat şi în capitolul 3, de la dimensiunea lui maximă de mai multe miliarde de ani-lumină, universul se va restrânge la milioane de ani-lumină, în fiecare moment viteza de apropiere sporind, pe măsură ce *totul* este strivit laolaltă până la dimensiunea unei galaxii, apoi la dimensiunea unei stele, a unei planete, a unei portocale, a unui bob de mazăre, a unui fir de nisip şi mai departe, conform relativităţii generale, spre dimensiunea unei molecule, a unui atom, apoi, în final, printr-o prăbuşire cosmică inexorabilă spre *dimensiune nulă*. Conform teoriei convenţionale, universul a pornit de la o stare iniţială de dimensiune zero şi, dacă are masă suficientă, va sfârşi printr-o restrângere într-o stare similară de compresie cosmică finală.

Dacă însă scara distanţelor implicate este de ordinul lungimii Planck sau mai mică, mecanica cuantică infirmă ecuaţiile relativităţii generale, după cum ştim deja. Trebuie să folosim teoria corzilor. Astfel, dacă relativitatea generală a lui Einstein permite formei geometrice a universului să devină oricât de mică, la fel cum matematica geometriei lui Riemann permite unei forme abstracte să devină oricât de mică ne putem imagina, se pune întrebarea ce modificări aduce în această privinţă teoria corzilor. Aşa cum vom vedea, există dovezi că, din nou, teoria corzilor stabileşte o limită inferioară pentru distanţele accesibile

fizic și afirmă că universul nu poate fi restrâns la o mărime mai mică decât lungimea Planck în nici una din dimensiunile lui spațiale.

Având deja unele cunoștințe despre teoria corzilor, ne-am putea hazarda să ne închipuim ce se întâmplă. Am putea spune că oricâte puncte punem unul peste altul – adică particule punctiforme – volumul lor combinat va fi tot zero. În schimb, dacă aceste particule sunt într-adevăr corzi, strânse laolaltă cu orientări aleatoare, ele vor ocupa un spațiu de dimensiune diferită de zero, asemănător unei mingi din benzi elastice de dimensiune Planck. Afirmația ar fi în concordanță cu noua orientare, însă s-ar pierde trăsături subtile și semnificative pe care teoria corzilor le folosește cu eleganță pentru a sugera o dimensiune minimă a universului. Aceste trăsături subliniază, într-o manieră concretă, noua fizică a corzilor ce intră în scenă și impactul ei asupra spațiului-timp.

Pentru a explica aceste aspecte importante, să luăm un exemplu care înlătură detaliile neesențiale, fără a sacrifica noua fizică. În loc să considerăm toate cele zece dimensiuni spațio-temporale ale teoriei corzilor, sau chiar și cele patru dimensiuni spațio-temporale extinse cu care suntem obișnuiți, să ne întoarcem la Universul Furtunului. Am introdus acest univers cu două dimensiuni spațiale în capitolul 8, într-un context ce nu includea corzile, pentru a explica aspecte ale ideilor lui Kaluza și Klein din anii 1920. Să-l folosim acum ca pe un „teren de joacă spațial" pentru a explora proprietățile teoriei corzilor într-un cadru simplu. Vom folosi apoi cele descoperite pentru a înțelege mai bine toate dimensiunile spațiale impuse de teoria corzilor. În acest scop, să ne imaginăm că dimensiunea circulară a Universului Furtunului este la început normală, pentru ca ulterior să se restrângă tot mai mult, apropiindu-se de forma Țării Liniare – o versiune parțială, simplificată a marii implozii.

Întrebarea la care vrem să răspundem este dacă proprietățile geometrice și fizice ale acestui colaps cosmic diferă semnificativ în cazul unui univers bazat pe corzi față de cazul unui univers bazat pe particule punctiforme.

Caracteristica esențial nouă

Nu trebuie să căutăm prea departe pentru a găsi fizica elementară a corzilor. O particulă punctiformă care se deplasează în acest univers



Figura 10.2 Particulă punctiformă mişcându-se pe un cilindru.

bidimensional poate efectua tipurile de mişcări ilustrate în figura 10.2. Ea se poate deplasa de-a lungul dimensiunii extinse a furtunului, se poate mişca în jurul părţii curbate sau poate executa orice combinaţie a acestor două mişcări. O buclă de coardă poate face aceleaşi mişcări, singura diferenţă fiind că ea va oscila în timpul acestor mişcări pe suprafaţă, aşa cum se vede în figura 10.3 (a). Această diferenţă a fost deja discutată în detaliu: oscilaţiile corzii îi determină acesteia proprietăţile fizice cum ar fi masa şi sarcina de forţă. Deşi e un aspect esenţial al teoriei corzilor, nu ne vom concentra acum asupra lui, din moment ce am înţeles deja implicaţiile lui fizice.

Ne vom concentra în schimb asupra unei alte diferenţe dintre mişcarea particulelor punctiforme şi cea a corzilor, o diferenţă ce depinde direct de *forma* spaţiului prin care se mişcă coarda. Cum coarda este un obiect extins, există şi o altă configuraţie posibilă pe lângă cele deja menţionate. Ea se poate *înfăşura în jurul* părţii circulare a furtunului, ca un lasou, aşa cum se vede în figura 10.3 (b).[88] Coarda va continua să alunece şi să oscileze, dar mişcarea va avea loc în această configuraţie extinsă. De fapt, coarda se poate înfăşura în jurul părţii circulare a spaţiului de oricâte ori, după cum se vede tot în figura 10.3 (b), şi va executa din nou mişcări oscilatorii în timp ce alunecă.



Figura 10.3 Corzile se pot mişca pe un cilindru în două feluri diferite – în configuraţii „neînfăşurate“ sau în configuraţii „înfăşurate“.

Dacă o coardă este înfăşurată într-o asemenea configuraţie, spunem că se află într-un *mod de înfăşurare*. Acest mod de înfăşurare este o posibilitate inerentă corzilor. Nu există ceva asemănător în cazul particulelor punctiforme. Să vedem acum care sunt implicaţiile acestui tip de mişcare calitativ nou asupra corzii însăşi şi asupra proprietăţilor geometrice ale dimensiunii pe care o înfăşoară.

Fizica corzilor înfăşurate

În discuţiile anterioare privind mişcarea corzilor ne-am concentrat asupra corzilor neînfăşurate. Corzile care se înfăşoară în jurul unei componente spaţiale circulare au aproape aceleaşi proprietăţi pe care le-am studiat deja. Oscilaţiile lor, asemeni oscilaţiilor corzilor neînfăşurate, contribuie din plin la proprietăţile observate. Diferenţa esenţială este că o coardă înfăşurată are o masă *minimă* determinată de *mărimea* dimensiunii circulare şi de numărul de înfăşurări în jurul acesteia. Mişcarea oscilatorie a corzii dă o contribuţie suplimentară la acest minimum.

Nu e greu de înţeles originea acestei mase minime. O coardă înfăşurată are o lungime minimă determinată de circumferinţa dimensiunii circulare şi de numărul de răsuciri în jurul ei. Lungimea minimă a corzii determină masa minimă: cu cât lungimea e mai mare, cu atât şi masa e mai mare. Cum circumferinţa unui cerc e proporţională cu raza lui, masele minime implicate în modurile de înfăşurare sunt proporţionale cu raza cercului în jurul căruia se răsucesc. Folosind relaţia lui Einstein $E = mc^2$ care leagă masa de energie, putem spune de asemenea că energia înmagazinată într-o coardă înfăşurată este proporţională cu raza dimensiunii circulare. (Şi corzile neînfăşurate au o minusculă lungime minimă, căci dacă n-ar avea-o am fi înapoi în domeniul particulelor punctiforme. Acelaşi raţionament ne-ar putea duce la concluzia că şi corzile neînfăşurate au o masă minimă minusculă, dar diferită de zero. Într-un fel aşa şi este, dar efectele cuantice pe care le-am întâlnit în capitolul 6 – amintiţi-vă de *Preţul corect* – pot anula această contribuţie la masă. Astfel, corzile neînfăşurate pot produce fotonul, gravitonul şi toate celelalte particule fără masă sau cu masa aproape zero. În privinţa asta, corzile înfăşurate sunt diferite.)

Cum afectează existența configurațiilor corzilor înfășurate proprietățile *geometrice* ale dimensiunii în jurul căreia sunt înfășurate? Răspunsul, dat pentru prima oară în 1984 de fizicienii japonezi Keiji Kikkawa și Masami Yamasaki, este ciudat, dar remarcabil.

Să ne transpunem în ultimele stadii ale variantei noastre asupra marii implozii din Universul Furtunului. După ce raza dimensiunii circulare se restrânge până la lungimea Planck, în modelul dat de relativitatea generală, ea continuă să se restrângă spre lungimi din ce în ce mai mici; teoria corzilor însă propune o interpretare radical diferită. Ea susține că *toate* procesele fizice din Universul Furtunului în care raza dimensiunii circulare este mai mică decât lungimea Planck și scade continuu sunt absolut identice cu procesele în care dimensiunea circulară este mai mare decât lungimea Planck și crește continuu! Asta înseamnă că încercarea dimensiunii circulare de a coborî sub lungimea Planck către lungimi tot mai mici devine inutilă din cauza teoriei corzilor, care pune stăpânire asupra geometriei. Teoria corzilor ne demonstrează că această evoluție poate fi reformulată – reinterpretată – spunând că dimensiunea circulară se restrânge până la lungimea Planck, pentru ca apoi să se extindă. Teoria corzilor rescrie legile geometriei pentru distanțe mici, astfel încât ceea ce părea a fi înainte un colaps cosmic este privit acum ca un *salt* cosmic. Dimensiunea circulară se poate restrânge până la lungimea Planck. Însă, datorită modurilor de înfășurare, încercările de a continua restrângerea duc de fapt la o expansiune. Să vedem de ce.

Spectrul de stări ale corzii*

Noua posibilitate a configurațiilor înfășurate face ca energia unei corzi din Universul Furtunului să provină din *două* surse: din mișcarea de vibrație și din energia de înfășurare. Conform lui Kaluza și Klein, ambele depind de geometria furtunului, adică de raza componentei circulare încolăcite, dar trebuie remarcat că aceasta e o caracteristică a corzilor, din moment ce o particulă punctiformă nu se poate înfășura

---

* Unele dintre ideile expuse în această secțiune și în câteva din cele ce urmează sunt destul de subtile, așa încât nu fiți dezamăgiți dacă nu puteți urmări fiecare verigă din lanțul raționamentelor – mai ales la o singură lectură. (*N. a.*)

în jurul unei dimensiuni. Prima noastră sarcină va fi deci să determinăm cu precizie modul în care contribuțiile la energia corzii date de vibrații și de înfășurări depind de mărimea dimensiunii circulare. În acest scop, este convenabil să separăm mișcarea de vibrație a corzilor în două categorii: vibrații *uniforme* și vibrații *obișnuite*. Vibrațiile obișnuite sunt acele oscilații despre care am vorbit de multe ori, de tipul celor ilustrate în figura 6.2. Vibrațiile uniforme sunt mișcări și mai simple, de pildă mișcarea de ansamblu a corzii care alunecă dintr-o poziție în alta fără a-și schimba forma. Toate mișcările corzii sunt o combinație de alunecări și oscilații – de vibrații uniforme și obișnuite – dar e mai simplu să le separăm în acest mod. De fapt, vibrațiile obișnuite nu vor avea un rol important în raționamentul nostru, de aceea vom include efectele lor doar abia la urmă.

Iată două observații esențiale. Mai întâi, excitațiile de vibrație uniformă ale unei corzi au energii *invers* proporționale cu raza dimensiunii circulare. Aceasta este o consecință directă a principiului de incertitudine din mecanica cuantică: o rază mai mică îngrădește mai mult o coardă, deci, conform claustrofobiei cuantice, mărește cantitatea de energie a mișcării acesteia. Prin urmare, odată cu scăderea razei dimensiunii circulare, energia de mișcare a corzii crește – semn distinctiv al proporționalității inverse. În al doilea rând, așa cum am arătat în paragraful anterior, energiile modurilor de înfășurare sunt *direct* proporționale cu raza. Să ne amintim că aceasta se datorează faptului că lungimea minimă a corzilor înfășurate, deci și energia lor minimă, este proporțională cu raza. Aceste două observații stabilesc faptul că valori mari ale razei implică energii de înfășurare mari și energii de vibrație mici, în timp ce valori mici ale razei implică energii de înfășurare mici și energii de vibrație mari.

Aceasta ne conduce la esența problemei: În Universul Furtunului, pentru orice valoare mare a razei furtunului, există o rază corespunzătoare mai mică, astfel încât energiile de înfășurare ale corzilor din primul univers sunt egale cu energiile de vibrație ale corzilor din cel de-al doilea univers, iar energiile de vibrație ale corzilor din primul sunt egale cu energiile de înfășurare ale corzilor din cel de-al doilea. Cum proprietățile fizice depind de energia *totală* a configurației corzii – și nu de modul în care energia se împarte între contribuția vibrației și contribuția înfășurării – nu există *nici o deosebire fizică* între aceste forme *geometric distincte* ale Universului Furtunului. Astfel, oricât

de straniu ar părea, teoria corzilor afirmă că nu există nici o diferență între un univers „gras“ al furtunului și unul „slab“.

Este ca și cum, la nivel cosmic, ai paria pe mai mulți cai deodată, căci așa ar face un investitor prevăzător pus în fața următoarei probleme. Să ne imaginăm că aflați că acțiunile la bursă pentru două companii – de pildă, una care fabrică aparate de gimnastică, iar cealaltă valve coronariene – sunt strâns legate între ele. La încheierea zilei, valoarea acțiunilor fiecărei companii era de 1$, iar o sursă de încredere vă spune că dacă acțiunile unei companii cresc, acțiunile celeilalte scad, și invers. Mai mult, sursa de încredere (ale cărei informații depășesc poate limitele legale) vă spune că la închiderea zilei următoare valorile acțiunilor celor două companii vor fi invers proporționale. Adică, dacă pentru o companie valoarea acțiunilor va fi de 2 $, pentru cealaltă va fi de ½ $ (50 cenți), iar dacă pentru prima va fi de 10 $, pentru cealaltă va fi de 1/10 $ (10 cenți) și așa mai departe. Dar singurul lucru pe care sursa nu vi-l poate spune cu precizie este care dintre acțiuni va avea valoarea mare și care valoarea mică. Ce faceți atunci?

Veți investi toți banii în acțiuni, cumpărând în mod egal acțiuni la aceste două companii. Așa cum puteți verifica imediat din câteva exemple, indiferent ce se va întâmpla în ziua următoare, investiția nu își va pierde valoarea. În cel mai rău caz va rămâne aceeași (dacă la închiderea zilei valorile acțiunilor celor două companii vor fi tot de 1 $), dar orice schimbare a valorii acțiunilor – în conformitate cu informațiile primite – va face ca investiția să crească. De exemplu, dacă valoarea la închidere a acțiunilor companiei care fabrică aparate de gimnastică este de 4 $, iar valoarea la închidere a acțiunilor companiei de valve este de ¼ $ (25 cenți), valoarea lor combinată este 4,25 $ pentru fiecare pereche de acțiuni, față de 2 $ valoarea din ziua precedentă. Mai mult, din perspectiva venitului net, nu contează dacă valoarea acțiunilor primei companii e mai mare decât valoarea acțiunilor celei de-a doua companii sau invers. Dacă vă interesează doar suma totală, aceste două situații distincte sunt din punct de vedere financiar identice.

Situația din teoria corzilor este similară, în sensul că energia configurațiilor corzii provine din două surse – vibrații și înfășurări – ale căror contribuții la energia totală a corzii sunt, în general, diferite. Dar, așa cum vom vedea mai detaliat în continuare, anumite perechi de situații geometrice diferite – care duc la energii de înfășurare mari,

combinate cu energii de vibrație mici, sau la energii de vibrație mari combinate cu energii de înfășurare mici – sunt din punct de vedere *fizic* indiscernabile. Spre deosebire de analogia financiară, unde considerațiile care trec dincolo de valoarea totală a investiției pot face o diferență netă între cele două tipuri de acțiuni, aici nu există absolut nici o diferență fizică între cele două scenarii ale corzilor.

De fapt, vom vedea că, pentru a face ca analogia cu teoria corzilor să fie mai veridică, vom considera și cazul în care nu ați împărți banii în mod egal între cele două companii la investiția inițială, ci ați cumpăra, să spunem, 1 000 de acțiuni la compania producătoare de aparate de gimnastică și 3 000 de acțiuni la compania de valve pentru inimă. Acum valoarea totală a investițiilor depinde de care anume dintre companii va avea acțiunile mai ridicate sau mai scăzute la închidere. De exemplu, dacă valorile la închidere sunt de 10 $ (compania producătoare de aparate de gimnastică) și 10 cenți (compania de valve), investiția inițială de 4 000 $ va valora acum 10 300 $. Dar dacă situația se inversează, investiția va valora 30 100 $, deci, semnificativ mai mult.

Relația de proporționalitate inversă dintre valorile la închidere ale acțiunilor duce la următoarea situație: dacă un prieten investește exact *invers*, scenariile în cele două cazuri se vor inversa. Adică, din perspectiva valorii totale a acțiunilor, efectul schimbării între ele a valorilor acțiunilor la închidere pentru cele două companii e compensat de schimbarea între ele a numerelor de acțiuni pentru cele două companii.

Să reținem această observație și să ne întoarcem la teoria corzilor. Să ne imaginăm că raza dimensiunii circulare a furtunului este de zece ori valoarea lungimii Planck. Vom scrie deci $R = 10$. O coardă se poate înfășura în jurul acestei dimensiuni circulare o dată, de două ori, de trei ori și așa mai departe. Numărul care arată de câte ori este înfășurată o coardă în jurul dimensiunii circulare se numește *număr de înfășurare*. Energia datorată înfășurării, fiind determinată de lungimea corzii înfășurate, este proporțională cu *produsul* dintre rază și numărul de înfășurare. În plus, pentru orice număr de înfășurare, coarda poate suferi mișcări de vibrație. Cum vibrațiile uniforme asupra cărora ne concentrăm acum au energii invers proporționale cu raza, ele sunt proporționale cu multiplii întregi ai inversului razei – $1/R$ – care este în acest caz o zecime din lungimea Planck. Vom numi acest multiplu întreg *număr de vibrație*.[89]

După cum se observă, situaţia este similară cu cea de la bursă, numerele de vibraţie şi de înfăşurare corespunzând acţiunilor deţinute la cele două companii, în timp ce R şi $1/R$ corespund valorilor la închidere ale acţiunilor pentru fiecare companie. Deci, la fel cum se calculează cu uşurinţă valoarea totală a investiţiei din numărul de acţiuni deţinute la fiecare companie şi din valoarea de închidere, se poate calcula energia totală pe care o are o coardă folosindu-ne de numărul său de vibraţie, numărul de înfăşurare şi rază. În tabelul 1.10 este prezentată o listă parţială a acestor energii totale pentru diverse configuraţii ale corzilor, pe care le specificăm prin numărul de înfăşurare şi prin numărul de vibraţie, presupunând că Universul Furtunului are raza $R = 10$.

Un tabel complet ar fi infinit de lung, pentru că numărul de înfăşurare şi numărul de vibraţie pot lua orice valori întregi, dar această mostră e sugestivă pentru discuţia noastră. Privind tabelul, observăm că avem de-a face cu energii de înfăşurare mari/energii de vibraţie joase: energiile de înfăşurare sunt multipli de 10, în timp ce energiile de vibraţie sunt multipli de 1/10.

Să ne imaginăm acum că raza dimensiunii circulare scade de la 10 la 0,1 (adică 1/10). În cazul acestei forme geometrice a furtunului, putem întocmi un tabel similar al energiilor corzii. Energiile de înfăşurare sunt acum multipli de 1/10, în timp ce energiile de vibraţie sunt multipli de 10 (adică inversul lui 1/10). Rezultatele sunt prezentate în tabelul 10.2.

La prima vedere, cele două tabele ar părea diferite. Dar o analiză mai atentă ne arată că, în ciuda aranjării într-o ordine diferită, coloanele de „energie totală" ale ambelor tabele au valori *identice*. Pentru a găsi valoarea corespunzătoare din tabelul 10.2 în tabelul 10.1 trebuie doar să inversăm numerele de vibraţie cu cele de înfăşurare. Contribuţiile aduse de mumerele de vibraţie şi de cele de înfăşurare joacă deci roluri complementare când valoarea razei dimensiunii circulare se modifică de la 10 la 1/10. Astfel, în ce priveşte valorile energiilor totale ale corzilor, *nu există nici o diferenţă* între aceste mărimi diferite ale dimensiunii circulare. La fel ca în cazul bursei, schimbarea între ele a razelor de 10 şi de 1/10 este compensată exact de inversarea numerelor de vibraţie şi de înfăşurare. Pentru simplificare, am considerat o rază iniţială de $R = 10$ şi valoarea inversă de 1/10, însă concluziile noastre rămân valabile pentru orice valoare a razei şi inversa ei.[90]

Număr de vibrație	Număr de înfășurare	Energia totală
1	1	1/10+10=10,1
1	2	1/10+20=20,1
1	3	1/10+30=30,1
1	4	1/10+40=40,1
2	1	2/10+10=10,2
2	2	2/10+20=20,2
2	3	2/10+30=30,2
2	4	2/10+40=40,2
3	1	3/10+10=10,3
3	2	3/10+20=20,3
3	3	3/10+30=30,3
3	4	3/10+40=40,3
4	1	4/10+10=10,4
4	2	4/10+20=20,4
4	3	4/10+30=30,4
4	4	4/10+40=40,4

Tabelul 10.1 Mostre de configurații de vibrație și de înfășurare ale unei corzi care se mișcă în universul prezentat în figura 10.3, cu raza R = 10. Energiile de vibrație contribuie cu multipli de 1/10, iar energiile de înfășurare contribuie cu multipli de 10, dând prin însumare valorile energiilor totale. Unitatea de energie este energia Planck, deci, de exemplu, 10,1 în ultima coloană înseamnă de 10,1 ori valoarea energiei Planck.

Tabelele 10.1 și 10.2 sunt incomplete din două motive. În primul rând, așa cum am mai menționat, în tabel au fost trecute doar o parte din posibilitățile infinite ale numerelor de înfășurare/vibrație ale unei corzi. Asta nu e însă nici o problemă – putem face tabelele oricât de lungi, relația dintre ele continuă să se păstreze. În al doilea rând, până acum am luat în considerare, pe lângă energiile de înfășurare, doar contribuțiile energetice apărute datorită mișcării de vibrație uniformă

Număr de vibrație	Număr de înfășurare	Energia totală
1	1	10+1/10=10,1
1	2	10+2/10=10,2
1	3	10+3/10=10,3
1	4	10+4/10=10,4
2	1	20+1/10=20,1
2	2	20+2/10=20,2
2	3	20+3/10=20,3
2	4	20+4/10=20,4
3	1	30+1/10=30,1
3	2	30+2/10=30,2
3	3	30+3/10=30,3
3	4	30+4/10=30,4
4	1	40+1/10=40,1
4	2	40+2/10=40,2
4	3	40+3/10=40,3
4	4	40+4/10=40,4

Tabelul 10.2 La fel ca în tabelul 10.1, cu deosebirea că valoarea razei este acum 1/10.

a corzii. Cum vibrațiile obișnuite aduc contribuții energetice suplimentare la energia totală a corzii, determinând sarcinile de forță ale acesteia, ar trebui incluse și ele în calcule. Cercetările au arătat un lucru important, și anume că aceste contribuții nu depind de mărimea razei. Deci, chiar dacă am include și aceste caracteristici ale corzilor în tabelele 10.1 și 10.2, corespondența dintre tabele s-ar păstra pentru că vibrațiile obișnuite contribuie identic în ambele tabele. Prin urmare, masele și sarcinile particulelor dintr-un univers al furtunului cu raza R sunt identice cu cele din Universul Furtunului cu raza $1/R$. Iar cum aceste mase și sarcini ale particulelor guvernează fizica fundamentală, nu se poate face nici o distincție fizică între aceste două universuri

geometric diferite. Oricărui experiment efectuat într-un univers îi corespunde în celălalt univers un altul cu rezultate identice.

O dispută

După ce au fost aplatizați, devenind ființe bidimensionale, George și Gracie devin profesori de fizică în Universul Furtunului. După ce și-au organizat cele două laboratoare rivale, fiecare pretinde să fi determinat mărimea dimensiunii circulare. Spre surprinderea tuturor, concluziile lor sunt diferite, deși ambii au bună reputație de cercetători. George pretinde că raza dimensiunii circulare este $R = 10$ lungimi Planck, în timp ce Gracie pretinde că raza dimensiunii circulare este $R = 1/10$ din lungimea Planck.

„Gracie", spune George, „din calculele bazate pe teoria corzilor, știu că, dacă dimensiunea circulară are raza 10, atunci mă aștept ca energiile corzilor să fie cele din tabelul 10.1. Am efectuat cu atenție experimentele, folosindu-mă de noul accelerator pentru energia Planck, iar ele au confirmat precis calculele mele. De aceea afirm cu toată încrederea că dimensiunea circulară are raza $R = 10$." În replică, Gracie face exact aceleași remarci, cu singura deosebire că lista energiilor calculate este cea din tabelul 10.2, și afirmă că raza este $R = 1/10$.

Într-un moment de revelație, Gracie îi arată lui George că cele două tabele, deși diferit aranjate, sunt de fapt identice. George, care așa cum știm deja raționează mai lent decât Gracie, se întreabă atunci: „Cum se poate una ca asta? Știu că valori diferite ale razei dau naștere la valori diferite ale energiilor corzilor și sarcinilor lor, în conformitate cu bazele mecanicii cuantice și cu proprietățile corzilor înfășurate. Dacă suntem de acord cu acest lucru, trebuie să cădem de acord și asupra razei."

Făcând apel la noua ei perspectivă asupra fizicii corzilor, Gracie răspunde: „Ceea ce spui tu nu e corect până la capăt. *În general*, este adevărat că valori diferite ale razei dau naștere la energii permise diferite. Totuși, în situații speciale când cele două valori ale razei sunt în raport invers, ca 10 și 1/10, energiile și sarcinile permise sunt identice. Vezi tu, ceea ce eu consider un mod de înfășurare, tu consideri un mod de vibrație, iar ceea ce eu consider un mod de vibrație, tu consideri un mod de înfășurare. Naturii însă nu-i pasă de limbajul pe care

îl folosim noi. Fizica este guvernată de proprietățile *ingredienților fundamentali*, masele particulelor (energiile lor) și sarcinile lor de forță. Indiferent dacă raza este *R* sau 1/*R*, lista completă a acestor proprietăți ale ingredienților fundamentali ai teoriei corzilor e identică."

Într-un moment de inspirație, George răspunde: „Cred că înțeleg. Deși descrierile pe care noi le dăm corzilor diferă, lista completă a caracteristicilor lor fizice este aceeași, indiferent dacă ele sunt înfășurate în jurul dimensiunii circulare sau vibrează. Cum proprietățile fizice ale universului depind de aceste proprietăți ale constituenților de bază, nu există nici o diferență, nici un mod de a deosebi situațiile în care razele se află în raport invers." Exact.

Trei întrebări

Acestea fiind zise, v-ați putea întreba: „Dacă aș fi o mică ființă din Universul Furtunului, aș măsura pur și simplu circumferința furtunului cu o ruletă, determinând astfel fără echivoc raza acestuia. Ce rost are să vorbim despre două posibilități indiscernabile, cu raze diferite? Apoi, chiar teoria corzilor elimină distanțele mai mici decât lungimea Planck, atunci de ce mai discutăm despre dimensiuni circulare având raze egale cu fracțiuni din lungimea Planck? Și, în fine, ce contează universul bidimensional al furtunului, ce ne aduce în plus când includem *toate* dimensiunile?"

Vom începe cu ultima întrebare deoarece răspunsul la ea ne va sili să le abordăm pe primele două.

Deși discuția noastră a avut loc în Universul Furtunului, noi am limitat dimensiunile spațiale la una încolăcită și una extinsă doar pentru simplificare. Dacă avem trei dimensiuni spațiale extinse și șase dimensiuni circulare – acestea din urmă fiind cele mai simple dintre spațiile Calabi-Yau – concluziile la care se ajunge sunt exact aceleași. Fiecare dintre cercuri are o rază care, dacă este schimbată cu inversa ei, creează un univers fizic identic.

Putem duce această concluzie cu un pas uriaș mai departe. În universul nostru observăm trei dimensiuni spațiale care, potrivit observațiilor astronomice, par să se extindă fiecare pe o lungime de aproximativ 15 miliarde de ani-lumină (un an-lumină înseamnă aproximativ 6 mii de miliarde de mile, deci această distanță este de vreo 90 de

mii de miliarde de miliarde de mile). După cum am spus şi în capitolul 8, nu putem ști ce se întâmplă mai departe. Nu ştim dacă aceste dimensiuni continuă la infinit sau dacă se curbează descriind un cerc imens, aflat dincolo de posibilitățile noastre de observație. În acest din urmă caz, un cosmonaut care călătoreşte în spațiu urmărind o direcție fixată, ar înconjura până la urmă universul, întorcându-se în punctul de unde a pornit, la fel ca Magellan care a călătorit în jurul Pământului.

Familiarele dimensiuni extinse pot avea deci şi ele formă circulară, fiind supuse identificării fizice a lui R cu $1/R$ din teoria corzilor. Pentru o estimare numerică, dacă dimensiunile familiare sunt circulare, atunci raza ar trebui să fie aproximativ egală cu cele 15 miliarde de ani-lumină menționate anterior, ceea ce înseamnă cam 10 trilioane de trilioane de trilioane de trilioane de trilioane de ori lungimea Planck ($R = 10^{61}$), iar ea continuă să crească odată cu expansiunea universului. Dacă teoria corzilor este corectă, această situație e identică fizic cu cea în care dimensiunile familiare sunt circulare, raza lor având minuscula valoare de $1/R=1/10^{61}=10^{-61}$ din lungimea Planck! *Acestea sunt binecunoscutele noastre dimensiuni într-o descriere alternativă, furnizată de teoria corzilor.* De fapt, folosind acest limbaj al inversărilor, aceste cercuri minuscule se micşorează din ce în ce mai mult cu trecerea timpului pentru că, odată cu creşterea lui R, $1/R$ scade. Cum se poate aşa ceva? Cum poate „încăpea" un om de un metru optzeci într-un asemenea univers microscopic? Cum poate fi acest univers infinitezimal identic din punct de vedere fizic cu uriaşa întindere a cerului? Am ajuns astfel la cea de-a doua întrebare din cele trei de la început: teoria corzilor părea să elimine posibilitatea de a examina distanțe mai mici decât lungimea Planck. Dar dacă o dimensiune circulară are raza R mai mare decât lungimea Planck, atunci inversul ei $1/R$ va fi în mod obligatoriu o fracțiune din lungimea Planck. Ce putem înțelege de aici? Răspunsul, care se va referi și la prima întrebare, va dezvălui un aspect subtil şi important al spațiului și distanțelor.

Două noțiuni de distanță în teoria corzilor

În perspectiva noastră asupra lumii, distanța e un concept fundamental, iar subtilitatea și profunzimea lui sunt mereu subestimate. Având în vedere efectele surprinzătoare pe care teoria specială şi cea generală

a relativității le-au avut asupra noțiunilor noastre de spațiu și timp, precum și noile caracteristici ce reies din teoria corzilor, ar trebui să analizăm mai atent definiția distanței. În fizică, definițiile care au cu adevărat sens sunt cele operaționale – adică definițiile care oferă, cel puțin în principiu, mijloacele pentru măsurarea a ceea ce a fost definit. La urma urmei, oricât de abstract ar fi un concept, o definiție operațională ne permite să-i reducem semnificația la un procedeu experimental prin care îi măsurăm valoarea.

Ce definiție operațională am putea da conceptului de distanță? În contextul teoriei corzilor, răspunsul va fi surprinzător. În 1988, fizicienii Robert Brandenberger de la Universitatea Brown și Cumrun Vafa de la Harvard au arătat că, dacă forma spațială a unei dimensiuni este circulară, pot fi date pentru distanță două definiții operaționale diferite, dar legate una de alta. Fiecare din ele generează un proces experimental de măsurare al distanței și se bazează, în mare, pe un principiu simplu: dacă un obiect de probă se deplasează cu o anumită viteză cunoscută, atunci o distanță poate fi determinată măsurând timpul care îi este necesar probei pentru a o traversa. Diferența dintre cele două procedee ține de alegerea probei. Prima definiție folosește corzi care *nu* sunt înfășurate în jurul dimensiunii circulare, în timp ce a doua definiție folosește corzi *înfășurate*. Vedem astfel că natura extinsă a obiectului de probă fundamental duce la existența a două definiții operaționale a distanțelor în teoria corzilor. Într-o teorie a particulelor punctiforme, unde nu apare ideea de înfășurare, există o singură definiție.

Cum diferă rezultatele celor două procedee? Răspunsul dat de Vafa și Brandenberger este pe cât de surprinzător, pe atât de subtil. Ideea de bază poate fi înțeleasă apelând la principiul de incertitudine. Corzile care nu sunt înfășurate se pot mișca liber de-a lungul întregii circumferințe a cercului, care are lungimea proporțională cu R. Conform principiul de incertitudine, energiile lor sunt proporționale cu $1/R$ (să ne amintim din capitolul 6 relația inversă dintre energia unei probe și distanțele care pot fi sondate cu ea). Pe de altă parte, am văzut că o coardă înfășurată are energia minimă proporțională cu R; principiul de incertitudine ne spune însă că aceasta, ca sondă pentru distanțe, are o precizie dată de inversul energiei, adică $1/R$. Forma matematică a acestei idei ne arată că, dacă fiecare din ele este folosită pentru măsurarea razei dimensiunii circulare a spațiului, corzile neînfășurate vor măsura R, în timp ce corzile înfășurate vor măsura $1/R$ (distanțele

sunt măsurate în multipli de lungime Planck). Rezultatele ambelor experimente sunt egal îndreptățite să reprezinte valoarea razei. Teoria corzilor ne spune că folosirea de probe diferite pentru măsurarea distanțelor poate duce la rezultate diferite. De fapt, această proprietate este adevărată pentru toate măsurătorile legate de distanțe și lungimi, nu numai în cazul determinării mărimii dimensiunii circulare. Rezultatele obținute folosind probe înfășurate sau neînfășurate vor fi invers proporționale.[91]

Dacă teoria corzilor descrie într-adevăr universul nostru, de ce nu au fost întâlnite până acum aceste două noțiuni posibile de distanță în viața de zi cu zi sau în cercetările științifice? De fiecare dată când vorbim despre distanță, o facem în conformitate cu experiența noastră care ne spune că există un singur concept de distanță, fără să ne ofere vreun indiciu despre un al doilea concept. De ce am ignorat posibilitatea alternativă? Răspunsul este că, în ciuda unui grad ridicat de simetrie în cele discutate, de fiecare dată când R (deci și $1/R$) diferă semnificativ de 1 (1 reprezentând lungimea Planck), una dintre definițiile noastre operaționale se dovedește a fi extrem de dificil de aplicat, în timp ce cealaltă este foarte ușor de aplicat. Cu alte cuvinte, am aplicat mereu soluția simplă, ignorând complet existența celeilalte posibilități.

Marea discrepanță dintre gradele de dificultate ale celor două abordări se datorează diferenței mari dintre masele obiectelor de probă folosite – energia de înfășurare înaltă/energie de vibrație joasă și viceversa – dacă raza R (prin urmare și $1/R$) diferă semnificativ de lungimea Planck ($R = 1$). În cazul razelor cu mult diferite de lungimea Planck, energia „înaltă“ corespunde probelor incredibil de masive – de miliarde și miliarde de ori mai grele decât protonul –, în timp ce energia „joasă“ corespunde probelor de masă aproape nulă. În asemenea condiții, este o diferență colosală între dificultățile celor două abordări, fiindcă, în prezent, mijloacele noastre tehnice nu ne permit să producem corzi grele. În practică deci, doar una dintre abordări este tehnologic realizabilă – aceea care implică cea mai ușoară dintre cele două tipuri de configurații ale corzilor. Aceasta este și cea folosită implicit până acum de fiecare dată când a fost vorba despre distanțe. Ea este cea care ne-a format intuiția.

Lăsând la o parte aspectele de ordin practic, într-un univers guvernat de teoria corzilor avem libertatea de a măsura distanțele folosind oricare dintre cele două abordări. Pentru a măsura „dimensiunea uni-

versului", astronomii examinează fotoni care au traversat cosmosul și au intrat din întâmplare în telescopul lor. Fotonii constituie configurațiile *ușoare* ale corzilor. Rezultatul obținut este cel menționat anterior, adică 10 ori lungimea Planck. Dacă cele trei dimensiuni spațiale familiare sunt într-adevăr circulare și teoria corzilor este corectă, astronomii ar trebui, în principiu, să poată măsura extinderea universului folosindu-se de modurile de înfășurare ale corzilor grele (utilizând bineînțeles un echipament cu totul diferit de cel existent în prezent), iar rezultatul ar trebui să fie inversul celui descoperit prin metoda actuală. În acest sens, putem considera universul ca fiind enorm, așa cum facem în general, sau extrem de mic. În conformitate cu configurațiile ușoare ale corzilor, universul este uriaș și în continuă expansiune; configurațiile grele ne spun că e minuscul și se contractă. Nu există nici o contradicție aici, ci sunt doar două definiții diferite, dar la fel de raționale, ale distanței. Prima definiție ne este mult mai familiară datorită limitărilor tehnologice, însă fiecare din ele e un concept la fel de bine întemeiat.

Acum putem răspunde la întrebarea anterioară privind existența oamenilor mari într-un univers mic. Când măsurăm înălțimea unui om și rezultatul obținut este, de pildă, un metru optzeci, folosim în mod necesar configurațiile ușoare. Pentru a compara aceste măsurători cu mărimea universului, trebuie să folosim același procedeu de măsurare și, după cum am mai spus, universul are aproximativ 15 miliarde de ani-lumină, un rezultat cu mult mai mare de un metru optzeci. Nu are sens să ne întrebăm cum poate un om intra într-un univers atât de mic ca acela măsurat cu ajutorul configurațiilor grele – e ca și cum am încerca să comparăm mere cu portocale. Avem acum două concepte de distanță – prin folosirea ca probe a corzilor grele sau ușoare – deci va trebui să comparăm distanțe măsurate în același mod.

O dimensiune minimă

Am reușit să parcurgem o cale lungă, iar acum vom ajunge la fondul problemei. Dacă măsurăm constant distanțele prin „metoda ușoară" – adică folosim modurile ușoare ale corzilor, nu cele grele – rezultatele obținute vor fi *întotdeauna* mai mari decât lungimea Planck. Pentru a înțelege mai bine, să reluăm ipotetica mare implozie a celor trei

dimensiuni extinse, presupunând că ele ar fi circulare. Să considerăm că, la începutul experimentului nostru mental, modurile neînfăşurate sunt cele uşoare şi folosindu-le s-a determinat că raza universului este enormă şi scade treptat. Odată cu micşorarea universului, modurile neînfăşurate devin mai grele, iar cele înfăşurate mai uşoare. Când raza scade până la lungimea Planck – deci când $R = 1$ – modurile de înfăşurare şi de vibraţie au mase comparabile. Cele două abordări în măsurarea distanţelor devin la fel de dificil de aplicat, dar ele vor duce la acelaşi rezultat căci valoarea inversă a lui 1 este tot 1.

Pe măsură ce raza continuă să se micşoreze, modurile înfăşurate devin mai uşoare decât cele neînfăşurate, iar cum noi optăm mereu pentru abordarea „cea mai simplă", *ele* vor fi acum cele folosite pentru măsurarea distanţelor. În conformitate cu această metodă de măsurare, care duce la valori inverse celor măsurate cu ajutorul modurilor neînfăşurate, *raza este mai mare decât lungimea Planck şi se află în continuă creştere.* Asta înseamnă că atunci când R (cantitatea măsurată prin corzi neînfăşurate) ajunge la 1 şi continuă să scadă, $1/R$ (măsurată prin corzi înfăşurate) ajunge la 1 şi continuă să crească. Prin urmare, dacă folosim mereu modurile uşoare ale corzilor – abordarea „simplă" în măsurarea distanţelor – valoarea minimă pe care o vom găsi va fi lungimea Planck.

În particular, marea implozie spre o dimensiune zero este evitată pentru că raza universului măsurată folosind ca sonde modurile uşoare ale corzilor este întotdeauna mai mare decât lungimea Planck. În loc să treacă de lungimea Planck spre o dimensiune din ce în ce mai mică, raza, măsurată prin modurile uşoare, scade spre lungimea Planck, pentru ca apoi să crească din nou. Implozia se transformă în explozie.

Folosirea modurilor uşoare ale corzilor pentru măsurarea distanţelor concordă cu noţiunea noastră convenţională de lungime – cea existentă înainte de descoperirea teoriei corzilor. După cum am văzut în capitolul 5, *acest* concept de distanţă duce la insurmontabilele probleme ale ondulaţiilor cuantice violente în cazul distanţelor la scară mai mică decât lungimea Planck. Vedem încă o dată, din această perspectivă complementară, că distanţele extrem de mici sunt evitate de teoria corzilor. În cadrul teoriei generale a relativităţii şi în cadrul matematic corespunzător al geometriei riemanniene există un singur concept de distanţă, iar acesta poate lua valori oricât de mici. În cadrul teoriei corzilor şi al geometriei cuantice, există două concepte de dis-

tanță. Folosindu-le pe ambele în mod judicios, găsim un concept de distanță ce corespunde și intuiției noastre, și teoriei generale a relativității pentru distanțe mari, dar e radical diferit de ele când distanțele devin mici. Mai precis, distanțele sub lungimea Planck sunt inaccesibile.

Cum aceste considerații sunt destul de subtile, să subliniem din nou un aspect esențial. Dacă nu am mai face distincția între abordarea „dificilă" și cea „simplă" în măsurarea lungimilor și am continua să folosim modurile neînfășurate atunci când *R* scade dincolo de lungimea Planck, s-ar părea că am ajunge într-adevăr la distanțe mai mici decât lungimea Planck. Dar, conform celor spuse anterior, cuvântul „distanță" din ultima frază trebuie interpretat cu atenție, fiindcă el poate avea două înțelesuri diferite, doar una din ele conformându-se noțiunii noastre tradiționale. În acest caz, când *R* scade sub lungimea Planck, dar noi continuăm să folosim corzile neînfășurate (deși acum ele au devenit mai grele decât corzile înfășurate), folosim de fapt metoda „dificilă" de măsurare a distanțelor, deci cuvântul „distanță" nu mai are înțelesul obișnuit. Problema nu e însă doar una de semantică sau de convenție privind măsurătorile. Chiar dacă ne hotărâm să folosim conceptul nestandard de distanță, iar astfel să spunem că raza e mai mică decât lungimea Planck, *fizica* la care vom ajunge va fi, după cum am văzut deja, identică cu cea a universului în care raza, în accepțiunea convențională a noțiunii de distanță, este mai mare decât lungimea Planck (așa cum confirmă, de exemplu, corespondența exactă dintre tabelele 10.1 și 10.2). În fond, importantă e fizica, nu limbajul folosit.

Brandenberger, Vafa și alți fizicieni au folosit aceste idei pentru a sugera o rescriere a legilor cosmologiei în care nici marea explozie, nici posibila mare implozie să nu implice un univers de mărime nulă, ci unul care are lungimea Planck în toate dimensiunile. Ar fi o propunere foarte tentantă care ar înlătura dificultățile de ordin matematic, fizic și logic ale unui univers care se naște dintr-un punct infinit de dens sau colapsează într-un asemenea punct. Deși conceptual e dificil să ne închipuim întregul univers comprimat într-un bulgăre infim de dimensiuni Planck, e mult mai greu de imaginat un univers care se prăbușește într-un punct de dimensiune nulă. După cum vom vedea în capitolul 14, cosmologia corzilor este un domeniu aflat la începuturile sale, dar care promite foarte mult și ne oferă alternative mult mai credibile decât modelul big bang standard.

Cât de generală este această concluzie?

Ce se întâmplă însă dacă dimensiunile spaţiale nu au formă circulară? Mai sunt oare valabile concluziile privind extinderea spaţială minimă din teoria corzilor? Nimeni nu cunoaşte răspunsul cu certitudine. Aspectul esenţial al dimensiunilor circulare este acela că ele permit existenţa corzilor înfăşurate. Atât timp cât dimensiunile spaţiale, indiferent de detaliile formei lor, permit corzilor să se înfăşoare în jurul lor, majoritatea concluziilor la care am ajuns rămân neschimbate. Dar ce se întâmplă dacă, de exemplu, două dintre aceste dimensiuni au formă sferică? În acest caz corzile nu pot rămâne într-o configuraţie înfăşurată, pentru că pot „aluneca" asemenea unei benzi elastice pe o minge de baschet. Limitează oare teoria corzilor lungimea până la care se pot restrânge aceste dimensiuni?

Numeroase cercetări par să demonstreze că răspunsul depinde de condiţiile în care are loc restrângerea: fie se micşorează o întreagă dimensiune spaţială (ca în exemplele din acest capitol), fie (aşa cum vom vedea în capitolele 11 şi 13) doar o „bucată" izolată de spaţiu colapsează. Părerea generală a teoreticienilor corzilor este că, indiferent de formă, *există* o limită inferioară a mărimii, cam ca în cazul dimensiunilor circulare, dacă o întreagă dimensiune spaţială se micşorează. Confirmarea acestei predicţii e unul din obiectivele importante în cercetările viitoare, datorită impactului direct asupra mai multor aspecte din teoria corzilor, inclusiv asupra implicaţiilor ei cosmologice.

Simetria în oglindă

Prin teoria generală a relativităţii, Einstein a stabilit o legătură între fizica gravitaţiei şi geometria spaţio-temporală. La prima vedere, teoria corzilor pare să întărească şi să lărgească legătura între fizică şi geometrie, proprietăţile corzilor vibrante – masele şi sarcinile lor de forţă – fiind în mare parte determinate de proprietăţile componentelor spaţiale încolăcite. Tocmai am văzut că geometria cuantică, fizica geometrică asociată teoriei corzilor, are caracteristici surprinzătoare. În teoria generală a relativităţii şi în geometria „convenţională", un cerc de rază R este pur şi simplu diferit de unul cu raza $1/R$; în teoria corzilor însă,

cele două cercuri sunt indiscernabile. Acest fapt ne dă curajul să mergem mai departe şi să ne întrebăm dacă nu ar putea exista forme geometrice ale spaţiului care diferă şi mai mult – nu doar din punctul de vedere al mărimii totale, ci şi ca formă – dar sunt indiscernabile în teoria corzilor.

În 1988, Lance Dixon de la Centrul Acceleratorului Liniar din Stanford a făcut în acest sens o observaţie fundamentală, dezvoltată apoi de Wolfgang Lerche, de la CERN, de Vafa, de la Harvard, şi de Nicolas Warner, aflat pe atunci la Institutul Tehnologic din Massachusetts. Bazându-se pe argumente estetice născute din consideraţii de simetrie, aceşti fizicieni au avut curajul să sugereze că ar fi posibil ca două forme Calabi-Yau diferite, alese pentru dimensiunile spaţiale suplimentare încolăcite din teoria corzilor, să genereze o fizică identică.

Pentru a ne face o idee asupra modului în care această posibilitate s-ar putea realiza, să ne amintim că numărul de găuri ale dimensiunilor suplimentare Calabi-Yau determină numărul de familii în care se vor grupa excitaţiile corzilor. Aceste găuri sunt asemănătoare celor ale torului, sau ale formelor sale înrudite cu mai multe găuri ilustrate în figura 9.1. Unul dintre neajunsurile reprezentărilor noastre bidimensionale este acela că nu surprind faptul că spaţiul Calabi-Yau cu şase dimensiuni poate avea găuri de diferite dimensiuni. Deşi asemenea găuri sunt greu de reprezentat, ele pot fi descrise printr-o matematică deja bine pusă la punct. Esenţial e faptul că numărul familiilor de particule ce apar din vibraţiile corzilor depinde numai de numărul total de găuri, nu şi de numărul de găuri în fiecare dimensiune în parte (de aceea nu ne-am pus problema să facem o distincţie între diferitele tipuri de găuri în discuţia din capitolul 9). Să ne imaginăm două spaţii Calabi-Yau în care numărul de găuri în diverse dimensiuni diferă, dar numărul total de găuri este acelaşi. Cum numărul de găuri din fiecare dimensiune e diferit, cele două spaţii Calabi-Yau au forme diferite. Dar pentru că au acelaşi număr total de găuri, fiecare creează un univers cu *acelaşi număr de familii*. Aceasta este însă doar una dintre proprietăţile fizice. Un acord asupra *tuturor* proprietăţilor fizice este o cerinţă mult mai restrictivă, dar ne putem face măcar o idee asupra condiţiilor de valabilitate a ipotezei Dixon-Lerche-Vafa-Warner.

În toamna lui 1987 am primit o bursă postdoctorală la departamentul de fizică de la Harvard, iar biroul meu se afla chiar pe culoarul unde era şi cel al lui Vafa. Cum teza mea de doctorat avea ca subiect

proprietățile matematice și fizice ale dimensiunilor încolăcite Calabi-Yau din teoria corzilor, Vafa m-a ținut la curent cu cercetările sale în domeniu. În toamna anului 1988, a venit în biroul meu să-mi povestească despre interpretarea la care au ajuns el, Lerche și Warner. Am fost curios, dar și sceptic. Curiozitatea mi-a fost trezită când am înțeles că, dacă ipoteza lor este adevărată, ea va deschide noi posibilități de cercetare în teoria corzilor. Scepticismul s-a datorat gândului că a presupune e una, iar a stabili proprietățile unei teorii e cu totul altceva.

În lunile ce au urmat m-am gândit des la ipoteza lor și, ca să fiu sincer, eram pe jumătate convins că e neîntemeiată. Dar, în mod surprinzător, un proiect de cercetare aparent fără legătură cu acest subiect, la care lucram împreună cu Ronen Plesser, pe atunci doctorand la Harvard, iar acum profesor la Institutul Weizmann și la Universitatea Duke, avea să-mi schimbe complet punctul de vedere. Plesser și cu mine voiam să elaborăm niște metode matematice prin care, pornind de la o formă inițială Calabi-Yau, să ajungem alte forme Calabi-Yau necunoscute. Eram în special interesați de o tehnică de pliere numită *orbifolding*, descoperită pe la mijlocul anilor 1980 de Dixon, Jeffrey Harvey de la Universitatea din Chicago, Vafa și Witten. În esență, este o modalitate prin care diferite puncte ale unei forme inițiale Calabi-Yau sunt unite conform unor reguli matematice care ne asigură că noua formă este tot Calabi-Yau. Procedeul e ilustrat schematic în figura 10.4. Matematica aferentă operațiilor din figura 10.4 este formidabilă, de aceea teoreticienii au putut studia amănunțit acest procedeu numai atunci când se aplică celor mai simple forme – versiuni în mai multe dimensiuni ale covrigilor din figura 9.1. Plesser și cu mine am înțeles că unele descoperiri ale lui Doron Gepner, pe atunci la Universitatea Princeton, ar putea furniza un cadru teoretic solid pentru aplicarea plierii *orbifolding* la forme Calabi-Yau oricât de complicate, cum ar fi cele din figura 8.9.

După câteva luni de cercetări intense, am ajuns la o concluzie uimitoare. Dacă alipim anumite grupuri de puncte în mod corespunzător, forma Calabi-Yau obținută diferă de forma inițială prin faptul că numărul găurilor de dimensiuni *impare* din noua formă Calabi-Yau este egal cu numărul găurilor de dimensiuni *pare* din varianta inițială, și invers. Asta înseamnă că numărul total de găuri, deci și numărul familiilor de particule, este *același* chiar dacă schimbarea par-impar face ca formele și structurile lor geometrice fundamentale să fie destul de diferite.[92]

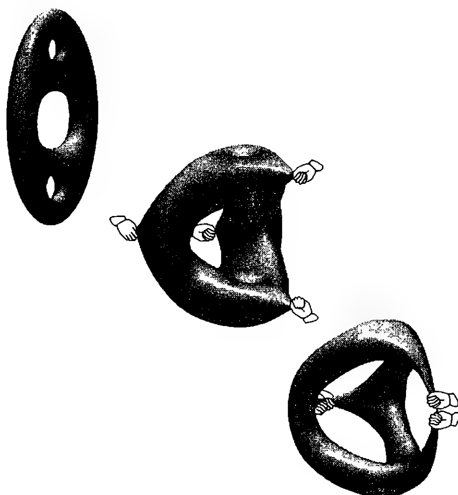


Figura 10.4 Plierea *orbifolding* este un procedeu prin care se ajunge la o nouă formă Calabi-Yau prin alipirea diverselor puncte ale unei forme inițiale.

Entuziasmați de legătura cu ipoteza Dixon-Lerche-Vafa-Warner, Plesser și cu mine ne-am pus întrebarea-cheie: dincolo de numărul familiilor de particule, oare restul proprietăților fizice ale cele două spații Calabi-Yau sunt de asemenea identice? După vreo două luni de analize matematice laborioase, în timpul cărora am primit încurajări și idei valoroase de la fostul meu coordonator de doctorat Graham Ross, de la Oxford, și de la Vafa, Plesser și cu mine am reușit să arătăm că răspunsul era un categoric *da*. Din rațiuni matematice legate de schimbarea par-impar, Plesser și cu mine am adoptat termenul de *mirror manifolds* (*varietăți în oglindă*) pentru descrierea spațiilor Calabi-Yau fizic echivalente, dar geometric distincte.[93] Spațiile individuale ale unei perechi în oglindă de spații Calabi-Yau nu sunt literalmente unul imaginea în oglindă a celuilalt, în accepțiunea curentă a noțiunii. Dar, chiar dacă au proprietăți geometrice diferite, ele dau naștere unuia și aceluiași univers atunci când sunt folosite pentru dimensiunile suplimentare din teoria corzilor.

În săptămânile care au urmat obținerii acestui rezultat am stat ca pe ghimpi. Știam că este o parte nouă și importantă a fizicii corzilor. Am demonstrat că strânsa asociere dintre fizică și geometrie, stabilită

de Einstein, este modificată substanțial de teoria corzilor: forme geometrice extrem de diferite care, în teoria generală a relativității ar implica proprietăți fizice diferite, dădeau naștere unei fizici identice în teoria corzilor. Dar dacă se strecurase o greșeală? Dacă implicațiile lor fizice difereau într-un mod atât de subtil, încât au trecut neobservate? De pildă, când i-am prezentat rezultatele noastre lui Yau, acesta a răspuns politicos, dar foarte ferm, că făcusem o greșeală. El a spus că din punct de vedere matematic rezultatele noastre erau prea neobișnuite pentru a fi corecte. Afirmația lui ne-a oprit în loc. Una e să faci o greșeală într-o problemă minoră care nu atrage atenția. Rezultatul nostru însă sugera un pas neașteptat într-o direcție nouă și ar fi suscitat cu certitudine o reacție puternică. Dacă era greșit, toată lumea ar fi aflat.

În fine, după multe verificări și răsverificări, încrederea noastră a sporit și am trimis lucrarea spre publicare. Câteva zile mai târziu, stăteam în birou la Harvard când a sunat telefonul. Era Philip Candelas de la Universitatea din Texas, care m-a întrebat imediat dacă stăteam pe scaun. Stăteam într-adevăr pe scaun. Atunci mi-a spus că el împreună cu doi studenți de-ai lui, Monika Lynker și Rolf Schimmrigk, descoperiseră un lucru care mă va trânti jos de pe scaun. Din examinarea atentă a unui eșantion uriaș de spații Calabi-Yau, pe care le generaseră pe calculator, descoperiseră că aproape toate erau perechi, diferind tocmai prin schimbarea numărului de găuri pare și impare. I-am răspuns că încă stăteam pe scaun – Plessner și cu mine ajunsesem la același rezultat. Până la urmă s-a dovedit că studiul lui Candelas și studiul nostru erau complementare; noi făcuserăm un pas înainte demonstrând că toate proprietățile care rezultau pentru o pereche în oglindă erau identice, în timp ce Candelas și studenții săi arătaseră că un eșantion mult mai mare de spații Calabi-Yau aveau perechi în oglindă. Cele două lucrări au dus la descoperirea *simetriei în oglindă* a teoriei corzilor.[94]

Fizica și matematica simetriei în oglindă

Ieșirea de sub imperiul asocierii unice și rigide a lui Einstein între geometria spațiului și fizica observabilă este una dintre schimbările spectaculoase de paradigmă ale teoriei corzilor. Această descoperire însă e mult mai mult decât o modificare a perspectivei filozofice. Sime-

tria în oglindă constituie o unealtă foarte folositoare şi pentru înţelegerea fizicii teoriei corzilor, şi pentru matematica spaţiilor Calabi-Yau.

Matematicienii care lucrau într-un domeniu numit geometrie algebrică studiaseră spaţiile Calabi-Yau din motive pur matematice cu mult înainte de descoperirea teoriei corzilor. Ei descoperiseră multe din proprietăţile acestor spaţii geometrice, fără să se gândească la vreo viitoare aplicaţie fizică. Anumite aspecte ale spaţiilor Calabi-Yau se dovediseră însă dificil, dacă nu imposibil de lămurit complet, dar prin descoperirea simetriei în oglindă în teoria corzilor, situaţia s-a schimbat. În esenţă, simetria în oglindă spune că anumite perechi de spaţii Calabi-Yau, perechi despre care se credea anterior că erau complet independente, sunt acum intim legate în cadrul teoriei corzilor. Legătura se face prin universul fizic comun la care conduce fiecare din spaţiile-pereche dacă este ales pentru dimensiunile suplimentare încolăcite. Această legătură, nebănuită anterior, oferă puternice unelte fizice şi matematice.

Să ne imaginăm, de exemplu, că vrem să calculăm proprietăţile fizice – masele particulelor şi sarcinile de forţă – asociate unei posibile alegeri a spaţiului Calabi-Yau pentru dimensiunile suplimentare. Preocuparea noastră principală nu e neapărat concordanţa rezultatelor detaliate cu experimentul, căci, aşa cum am văzut, obstacolele teoretice şi tehnologice fac acest lucru destul de dificil în prezent. Efectuăm în schimb un experiment mental prin care să aflăm cum *ar* arăta lumea dacă un anume spaţiu Calabi-Yau *ar fi* selectat. Pentru o vreme totul merge bine, dar brusc ajungem la un calcul matematic de o dificultate insurmontabilă. Nici măcar cei mai mari experţi din lume nu-şi pot da seama cum trebuie continuat. Suntem blocaţi. Apoi ne dăm seama că acest spaţiu Calabi-Yau are un partener în oglindă. Cum cei doi membri ai perechii conduc la aceeaşi fizică, ne dăm seama că putem face calculele folosind oricare dintre parteneri. Astfel, vom reformula calculele dificile efectuate pentru spaţiul Calabi-Yau iniţial aşa încât ele să-l implice acum pe partenerul său în oglindă, fiind siguri că rezultatul lor – adică fizica – va fi acelaşi. În primul moment, ne-am putea gândi că varianta reformulată a calculelor va fi la fel de dificilă ca în cazul spaţiului iniţial. Însă aici ne aşteaptă o surpriză foarte plăcută. Vom descoperi că, deşi rezultatul este identic, forma detaliată a calculelor este foarte diferită, iar în unele cazuri, calcule extrem de dificile se transformă într-unele extrem de simple în cazul spaţiului Calabi-Yau

în oglindă. Nu există o explicație limpede, însă este cert că, cel puțin pentru anumite calcule, așa se întâmplă, iar acest lucru scade mult nivelul de dificultate. Rezultatul e clar: nu mai suntem blocați.

Este ca și cum cineva ne-ar cere să numărăm cu precizie numărul portocalelor aruncate în dezordine într-o cutie uriașă cu laturile de vreo 20 de metri și înălțimea de 3 metri. Am începe să le numărăm una câte una, dar ne-am da repede seama că sarcina e prea laborioasă. Din fericire însă, apare un prieten care a fost de față când au fost aduse portocalele. El ne spune că erau împachetate cu grijă în cutii mai mici (din întâmplare ține în mână una dintre cutii) puse una peste alta, câte 20 de cutii pe înălțime, având la bază un pătrat cu latura de lungimea a 20 de cutii. Vom putea calcula rapid că au fost aduse 8 000 de cutii, iar singurul lucru care mai rămâne de făcut e să ne dăm seama câte portocale erau într-o cutie. Asta se rezolvă ușor împrumutând lada de la prietenul binevoitor și umplând-o cu portocale. Astfel, e posibil să facem o socoteală complicată cu efort minim. În esență, reorganizând în mod judicios calculele, sarcina devine mult mai ușoară.

Situația multor calcule din teoria corzilor e asemănătoare. Din perspectiva unui spațiu Calabi-Yau, calculele ar putea implica un mare număr de pași matematici foarte dificili. Dar calculele pentru spațiul în oglindă se reorganizează mult mai eficient și pot fi efectuate relativ ușor. Plesser și cu mine am demonstrat acest lucru, iar el a fost folosit cu succes de Candelas și colaboratorii săi, Xenia de la Ossa și Linda Parker, de la Universitatea din Texas, și Paul Green de la Universitatea din Maryland. Ei au arătat că unele calcule neînchipuit de grele pot fi efectuate, folosind perspectiva în oglindă, în câteva pagini de algebră și cu ajutorul unui calculator personal.

Rezultatul a fost important pentru matematicieni, fiindcă unele dintre aceste calcule îi blocaseră de ani de zile. Teoria corzilor i-a salvat, sau cel puțin așa au pretins fizicienii.

Există o competiție rodnică, și în general amicală, între matematicieni și fizicieni. S-a întâmplat ca doi matematicieni norvegieni, Geir Ellingsrud și Stein Arild Strømme, să lucreze la unul din numeroasele calcule pe care Candelas și colaboratorii săi le-au efectuat cu ajutorul simetriei în oglindă. În esență, era vorba despre estimarea numărului de sfere care puteau fi „împachetate“ într-un anume spațiu Calabi-Yau, ceva în genul analogiei noastre cu numărarea portocalelor dintr-un container foarte mare. În 1991, la o întâlnire a matematicienilor și fizi-

cienilor de la Berkeley, Candelas a anunțat rezultatul la care ajunsese folosind teoria corzilor și simetria în oglindă: 317 206 375. Ellingsrud și Strømme au anunțat și ei rezultatul calculului lor matematic extrem de dificil: 2 682 549 425. Zile de-a rândul matematicienii și fizicienii s-au întrebat: cine avea dreptate. Problema s-a dovedit a fi o piatră de încercare pentru credibilitatea teoriei corzilor. S-a spus chiar că, în afara comparației cu experimentul, era cel mai bun test pentru teoria corzilor. În plus, rezultatele lui Candelas depășeau cu mult singularul rezultat numeric pe care Ellingsrud și Strømme pretindeau că l-au găsit. El și colaboratorii săi afirmau că au răspuns și la multe alte întrebări, cu mult mai dificile – atât de dificile, încât nici un matematician nu îndrăznise vreodată să și le pună. Dar erau oare valabile rezultatele teoriei corzilor? Întâlnirea s-a încheiat cu schimburi de experiență foarte utile între matematicieni și fizicieni, însă nu s-a ajuns la nici un răspuns privind discrepanța.

O lună mai târziu, un mesaj cu titlul *Fizica a ieșit învingătoare!* circula printre participanții la conferința de la Berkeley. Ellingsrud și Strømme descoperiseră o eroare în codul calculatorului lor, iar după înlăturarea erorii, rezultatele lui Candelas au fost confirmate. De atunci s-au făcut multe verificări matematice asupra valabilității cantitative a simetriei în oglindă din teoria corzilor. Toate au trecut testul cu brio. Chiar de curând, după aproape un deceniu de la descoperirea de către fizicieni a simetriei în oglindă, matematicienii au reușit să găsească substratul ei matematic. Bizuindu-se pe importantele contribuții ale matematicienilor Maxim Kontsevich, Yuri Manin, Gang Tian, Jun Li și Alexander Givental, Yau și colaboratorii săi Bong Lian și Kefeng Liu au găsit în final o confirmare matematică riguroasă a formulelor folosite pentru calculul sferelor din interiorul spațiilor Calabi-Yau, rezolvând astfel probleme care îi nedumeriseră de sute de ani pe matematicieni.

Dincolo de amănuntele conjuncturale, aceste progrese subliniază rolul pe care fizica a început să-l joace în matematica modernă. De mult timp fizicienii „săpau“ în arhivele matematice în căutarea uneltelor necesare pentru construirea și analizarea unor modele ale lumii fizice. Acum, prin descoperirea teoriei corzilor, fizicienii au început să se revanșeze oferind matematicienilor noi modalități de abordare ale problemelor nerezolvate. Teoria corzilor nu numai că oferă un cadru unificator pentru fizică, dar s-ar putea să unească printr-o legătură profundă fizica și matematica.

CAPITOLUL 11

Ruperea texturii spațiale

Dacă întinzi continuu o membrană din cauciuc, la un moment dat ea se va rupe. Această simplă constatare i-a făcut pe fizicieni să se întrebe, de-a lungul anilor, dacă același lucru ar putea fi adevărat și în privința texturii spațiale care formează universul. Cu alte cuvinte, e posibil ca textura spațială să se sfâșâie, sau aceasta e doar o extrapolare neavenită, datorată interpretării greșite a analogiei cu membrana?

Prin teoria generală a relativității, Einstein răspunde că textura spațială nu se poate rupe.[95] Ecuațiile teoriei generale a relativității sunt adânc înrădăcinate în geometria riemanniană și, după cum am observat în capitolele anterioare, acesta este un cadru care analizează distorsiunile din relațiile de distanță între puncte apropiate din spațiu. Pentru ca aceste relații de distanță să aibă sens, formalismul matematic aferent cere ca substratul spațiului să fie *neted*, termen cu înțeles matematic și tehnic, dar a cărui folosire curentă îi surprinde esența: fără cute, fără străpungeri, fără alăturarea unor piese separate și fără rupturi. Dacă în textura spațială ar apărea asemenea neregularități, ecuațiile teoriei generale a relativității ar deveni caduce, semnalând o catastrofă cosmică de un fel sau altul – situație dezastruoasă pe care însă universul nostru se pare că o evită.

Acest lucru nu i-a împiedicat de-a lungul anilor pe teoreticienii plini de imaginație să se gândească la posibilitatea unei noi formulări a fizicii, care să meargă dincolo de clasica teorie a lui Einstein și să includă fizica cuantică, și care ar arăta că textura spatială se poate sfâșia, se poate rupe sau poate fuziona. De fapt, când au înțeles că fizica cuantică conduce la ondulații violente pe distanțe scurte, unii fizicieni au emis ipoteza că ondulațiile și sfâșâierile ar putea fi o caracteristică micro-

scopică obişnuită a texturii spaţiale. Conceptul de *gaură de vierme* (noţiune familiară oricărui fan al serialului *Star Trek*) se foloseşte de asemenea presupuneri. Ideea de bază e simplă: imaginează-ţi că eşti directorul unei mari corporaţii având cartierul general la al nouăzecilea etaj al unuia dintre turnurile din World Trade Center, în New York.* Datorită unui capriciu din istoria corporaţiei, o ramură a ei cu care ai nevoie să iei legătura din ce în ce mai des este instalată la al nouăzecilea etaj al celuilalt turn. Cum nu este convenabil din punct de vedere practic să muţi nici unul dintre birouri, îţi vine o idee destul de logică. Să construieşti un pod de la un birou la altul care să lege cele două turnuri. Aceasta le-ar permite angajaţilor să se mişte uşor de la un birou la altul fără să fie nevoiţi să urce şi să coboare nouăzeci de etaje.

O gaură de vierme joacă un rol asemănător. Este un pod sau un tunel care oferă o scurtătură de la o regiune a universului la alta. Folosind un model bidimensional, să ne imaginăm că universul are o formă ca în figura 11. Dacă sediul central al corporaţiei se află lângă cercul

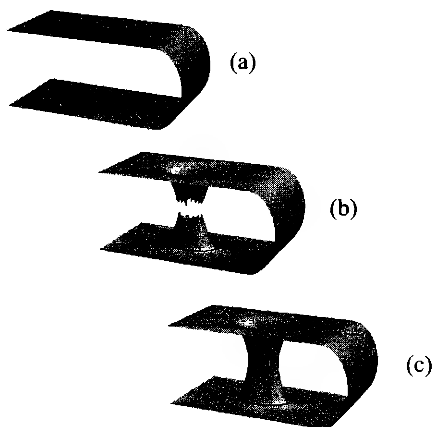


Figura 11.1 (a) Într-un univers în formă de U, singura cale de a te deplasa de la un capăt la celălalt este traversând întregul cosmos. (b) Textura spaţială se rupe şi două capete ale unei găuri de vierme încep să crească. (c) Cele două capete ale găurii de vierme se unesc formând un nou pod, o scurtătură de la un capăt al universului la celălalt.

* Cartea lui Greene a fost scrisă înaintea atentatului de la Word Trade Center. (*N. red.*)

inferior al figurii 11.1 (a), poți ajunge la birourile ramurii corporației, aflate lângă cercul de sus, doar traversând întregul drum în formă de U care te duce de la un capăt al universului la celălalt. Dar dacă textura spațială se poate rupe prin apariția unor străpungeri, ca în fig 11.1 (b), din care apoi vor putea crește tentacule ce se vor suda ca în figura 11.1 (c), atunci va apărea un pod spațial care va lega cele două regiuni inițial îndepărtate. Aceasta este o gaură de vierme. Gaura de vierme seamănă oarecum cu podul de la World Trade Center, dar există și o diferență esențială. Podul de la World Trade Center traversează o regiune *existentă* a spațiului, adică spațiul dintre cele două turnuri, în timp ce gaura de vierme creează o *nouă* regiune în spațiu, spațiul curbat bidimensional din figura 11.1 (a) fiind *singurul* spațiu existent (în analogia bidimensională). Regiunile aflate în afara membranei reflectă doar insuficiența imaginii, care prezintă universul în formă de U ca și cum ar fi un obiect aflat în cadrul universului nostru cu mai multe dimensiuni. Gaura de vierme creează un nou spațiu, deschizând astfel noi teritorii spațiale.

Există oare găuri de vierme în univers? Nu se știe. Presupunând că există, nu se poate spune dacă ar lua numai forme microscopice sau dacă ar traversa regiuni vaste din univers (ca în *Deep Space Nine*). Pentru a stabili dacă ele țin de realitate sau de ficțiune, trebuie mai întâi să aflăm dacă textura spațială se poate rupe.

Găurile negre oferă un alt exemplu în care textura spațiului este întinsă la maximum. În figura 3.7 am văzut cum câmpul gravitațional enorm al unei găuri negre creează o curbare atât de puternică, încât textura spațiului *pare* a fi ciupită sau străpunsă în centrul găurii negre. Spre deosebire de cazul găurilor de vierme, există dovezi experimentale clare care susțin existența găurilor negre, deci încercarea de a înțelege ce se întâmplă în centrul lor ține de știință, nu de speculație. Ecuațiile teoriei generele a relativității sunt nefolositoare în aceste condiții extreme. Unii fiziceni au sugerat că într-adevăr ar fi o străpungere, dar că suntem protejați împotriva acestei „singularități" cosmice de orizontul evenimentelor găurii negre, care împiedică orice lucru să scape din capcana ei gravitațională. Acest raționament l-a condus pe Roger Penrose de la Oxford să emită „ipoteza cenzurii cosmice" conform căreia asemenea neregularități spațiale pot apărea numai dacă ele sunt ascunse privirii noastre de vălul orizontului evenimentelor. Pe de altă parte, înainte de descoperirea teoriei corzilor, unii fizicieni

afirmau că fuziunea dintre mecanica cuantică şi relativitatea generală ar trebui să arate că aparenta străpungere a spaţiului este de fapt netezită, „cusută", prin consideraţii cuantice.

Descoperirea teoriei corzilor şi armonioasa îmbinare între mecanica cuantică şi gravitaţie au făcut în fine cu putinţă cercetarea acestor probleme. Deocamdată, teoreticienii corzilor nu au reuşit să dea un răspuns complet, dar în ultimii ani au fost lămurite câteva aspecte importante. În acest capitol vom vedea cum, pentru prima dată, teoria corzilor demonstrează că există anumite condiţii fizice – oarecum diferite de găurile de vierme şi de găurile negre – în care textura spaţiului se poate rupe.

O posibilitate fascinantă

În 1987, Shing-Tung Yau şi studentul său Gang Tian, aflat acum la Institutul Tehnologic din Massachusetts, au făcut o observaţie matematică interesantă. Folosind o metodă matematică bine cunoscută, ei au descoperit că anumite forme Calabi-Yau ar putea fi transformate în altele prin străpungerea suprafeţei lor şi coaserea găurii rezultate după un model matematic precis.[96] În esenţă, ei au identificat un anumit tip de sferă bidimensională, asemeni suprafeţei unei mingi de volei, aflată în interiorul unui spaţiu iniţial Calabi-Yau, ca în figura 11.2. (O minge de volei, asemeni tuturor obiectelor familiare nouă, este

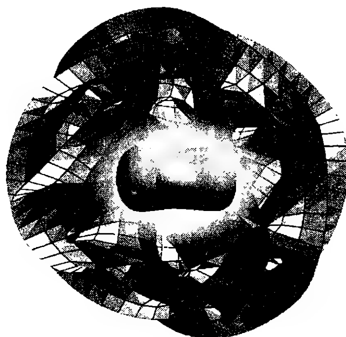


Figura 11.2 Zona evidenţiată din interiorul formei Calabi-Yau conţine o sferă.



Figura 11.3 O sferă din interiorul unui spaţiu Calabi-Yau se micşorează până la un punct, gâtuind textura spaţială. Pentru simplitate, în figurile următoare vom reprezenta doar o parte din întregul spaţiu Calabi-Yau.

tridimensională. Aici ne referim însă doar la suprafaţa ei, ignorând grosimea materialului din care e făcută, precum şi spaţiul interior pe care îl înglobează. Punctele de pe suprafaţa mingii pot fi localizate prin precizarea a două numere: „latitudinea“ şi „longitudinea“, la fel cum localizăm punctele de pe suprafaţa Pământului. Acesta este motivul pentru care *suprafaţa* mingii de volei, ca şi suprafaţa furtunului despre care am vorbit în capitolul anterior, este bidimensională.) Apoi ei au redus dimensiunea sferei până când a fost restrânsă la un singur punct, aşa cum se ilustrează prin secvenţa formelor din figura 11.3. Această figură, ca şi următoarele din acest capitol, a fost simplificată, luându-se în considerare cea mai relevantă „parte“ a formei Calabi-Yau, însă nu trebuie să uităm că aceste transformări se petrec în interiorul unor spaţii Calabi-Yau ceva mai mari, ca acelea din figura 11.2. În cele din urmă, Tian şi Yau şi-au imaginat că au rupt uşor spaţiul Calabi-Yau în locul gâtuit (figura 11.4 (a)), l-au desfăcut şi au lipit acolo o altă formă asemănătoare unei mingi (figura 11.4 (b)), pe care au umflat-o apoi (figurile 11.4 (c) şi (d)).

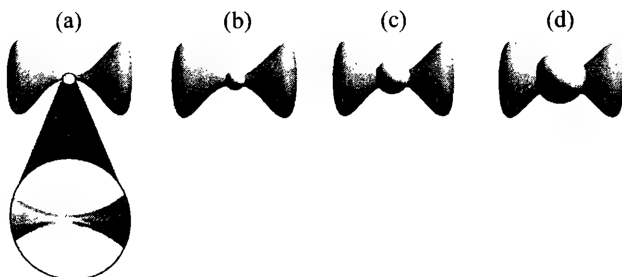


Figura 11.4 Un spaţiu Calabi-Yau gâtuit se rupe, iar în acel loc creşte o sferă care îi netezeşte suprafaţa. Sfera iniţiată din figura 11.3 este inversată.

Matematicienii numesc acest şir de operaţii *tranziţie cu inversie* [*flop-transition*]. Este ca şi cum mingea de volei iniţială ar fi „întoarsă", căpătând o nouă orientare în cadrul întregii forme Calabi-Yau. Yau, Tian şi alţii au observat că, în anumite situaţii, noua formă Calabi-Yau produsă printr-o tranziţie cu inversie, ca în figura 11.4 (d), este *distinctă din punct de vedere topologic* de forma iniţială Calabi-Yau din figura 11.3 (a). Este, de fapt, un mod pretenţios de a spune că e absolut imposibil să deformăm spaţiul iniţial Calabi-Yau din figura 11.3 (a) pentru a obţine spaţiul Calabi-Yau final din figura 11.4 (d) fără ruperea texturii spaţiului Calabi-Yau într-o etapă intermediară.

Din punct de vedere matematic, acest procedeu al lui Yau şi Tian este interesant pentru că ne oferă o modalitate de a produce noi spaţii Calabi-Yau dintr-unele cunoscute. Adevăratul lui potenţial se dezvăluie însă în domeniul fizicii, unde pune o problemă fascinantă: dincolo de metoda matematică în sine, e oare posibil ca secvenţa care leagă figura 11.3 (a) şi figura 11.4 (d) să fie întâlnită în natură? Contrar lui Einstein, e posibil ca textura spaţială *să se rupă, iar apoi să fie reparată* în acest mod?

Perspectiva în oglindă

Timp de câţiva ani după observaţia făcută în 1987, Yau mă îndemna din când în când să mă gândesc la o posibilă întruchipare fizică a acestor tranziţii cu inversie. Nu am făcut-o. Aceste tranziţii mi se păreau doar produsele unei matematici abstracte, fără nici o relevanţă pentru fizica teoriei corzilor. De fapt, având în vedere că în capitolul 10 am arătat că dimensiunile circulare au o rază minimă, am fi tentaţi să spunem că teoria corzilor nu permite sferei din figura 11.3 să se micşoreze până la acel punct de gâtuire. Dar, tot în capitolul 10, am văzut că, dacă o „bucată" a spaţiului – în cazul nostru partea sferică a formei Calabi-Yau – suferă un colaps, spre deosebire de situaţia în care o întreagă dimensiune spaţială colapsează, afirmaţia privind identificarea razelor mari cu cele mici nu mai e direct aplicabilă. Totuşi, chiar dacă tranziţiile cu inversie nu sunt interzise, posibilitatea ca textura spaţială să se rupă părea în continuare improbabilă.

În 1991, fizicianul norvegian Andy Lütken şi Paul Aspinwall, un coleg al meu de la Oxford, acum profesor la Universitatea Duke, şi-au

pus o întrebare foarte interesantă. Dacă textura spațială a porțiunii Calabi-Yau din universul nostru ar suferi o tranziție cu inversie care ar sfâșia spațiul, cum ar arăta aceasta din perspectiva spațiului Calabi-Yau în oglindă? Pentru a înțelege sensul acestei întrebări, să ne amintim că proprietățile fizice ale ambilor membri ai perechii de forme Calabi-Yau în oglindă (dacă au fost selectate pentru dimensiunile suplimentare) sunt identice, dar complexitatea matematicii care trebuie folosită pentru a extrage aceste proprietăți poate diferi mult. Lütken și Aspinwall au emis ipoteza că tranziția cu inversie din figurile 11.3 și 11.4, atât de complicată din punct de vedere matematic, ar putea avea o descriere mult mai simplă în oglindă, descriere ce ar dezvălui mai ușor fizica asociată.

La vremea aceea, simetria în oglindă nu era suficient de bine înțeleasă pentru a răspunde la întrebarea lor. Totuși, Lütken și Aspinwall au observat că în descrierea în oglindă nu părea să existe nimic care să indice vreo consecință fizică dezastruoasă asociată rupturilor spațiale din tranzițiile cu inversie. Cam în aceeași perioadă, cercetările la care Plesser și cu mine lucram pentru a găsi perechi de forme Calabi-Yau în oglindă ne-au condus în mod neașteptat la tranzițiile cu inversie. E un fapt matematic bine cunoscut că alipirea diverselor puncte din figura 10.4, metoda folosită de noi pentru a construi perechile în oglindă, duce la situații geometrice identice cu gâtuirile și străpungerile din figurile 11.3 și 11.4. Din punct de vedere fizic însă, nici eu, nici Plesser nu am descoperit vreo calamitate care să se datoreze lor. Mai mult, pornind de la observațiile lui Lütken și Aspinwall (precum și de la un articol mai vechi al lor scris împreună cu Graham Ross), Plesser și cu mine am înțeles că puteam repara matematic gâtuirea în două moduri diferite. Unul conducea la forma Calabi-Yau din figura 11.3 (a), iar celălalt la forma din figura 11.4 (d). Acest fapt ne-a sugerat că evoluția de la figura 11.3 (a) la 11.4 (d) putea fi într-adevăr întâlnită în natură.

Pe la sfârșitul lui 1991, cel puțin unii dintre teoreticienii corzilor credeau că textura spațiului *se poate rupe*. Dar nimeni nu avea argumente hotărâtoare pentru a confirma sau infirma această uimitoare posibilitate.

Avansând încet

În cursul anului 1992, Plesser și cu mine am încercat să demonstrăm că textura spațială poate suferi rupturi prin tranziții cu inversie. Cal-

culele noastre ofereau anumite dovezi, dar nu și demonstrația definitivă. La un moment dat, prin primăvară, Plesser a fost la Institutul pentru Studii Avansate din Princeton pentru a ține un seminar și a avut astfel ocazia să-i vorbească lui Witten despre încercările noastre de a înțelege matematica tranzițiilor cu inversie care produc rupturi spațiale în fizica teoriei corzilor. După ce i-a prezentat ideile noastre, Plesser a așteptat ca Witten să-i răspundă. Acesta s-a întors de la tablă și a început să privească pe fereastră. După un minut sau două, s-a întors din nou spre Plesser și i-a spus că, dacă ideile noastre s-ar confirma, „ar fi spectaculos". Afirmația lui ne-a încurajat. După o vreme însă, cum băteam pasul pe loc, am început fiecare să lucrăm la alte proiecte din teoria corzilor.

Continuam totuși să mă gândesc la posibilitatea tranzițiilor cu inversie care produc rupturi spațiale. Cu trecerea timpului, simțeam tot mai limpede că acestea trebuiau să fie o parte a teoriei corzilor. Calculele preliminarii efectuate împreună cu Plesser și discuțiile cu matematicianul David Morrison de la Universitatea Duke păreau să indice că aceasta era singura concluzie firească. De fapt, în timpul unei vizite la Universitatea Duke, Morrison și cu mine, bazându-ne pe observațiile prețioase ale lui Sheldon Katz de la Universitatea de Stat din Oklahoma, care se afla și el la Duke în acea perioadă, am stabilit o strategie prin care să demonstrăm că tranzițiile cu inversie pot avea loc în teoria corzilor. Dar, când am trecut la efectuarea calculelor, am descoperit că erau extrem de complicate. Chiar și cu cel mai rapid calculator din lume ar fi durat peste un secol. Făcuserăm un progres, însă era clar că aveam nevoie de o nouă idee care să sporească substanțial eficiența metodei noastre de calcul. Victor Batyrev, matematician la Universitatea din Essen, ne-a oferit pe neașteptate o asemenea idee în două lucrări publicate în primăvara și vara lui 1992.

Batyrev era foarte interesat de simetria în oglindă, mai ales în urma succesului obținut de Candelas și colaboratorii săi în rezolvarea problemei numărătorii sferelor prin folosirea acestei metode. Din perspectiva sa de matematician, Batyrev nu înțelegea bine metodele pe care Plesser și cu mine le folosiserăm pentru găsirea perechilor de spații Calabi-Yau în oglindă. Deși abordarea noastră făcea apel la instrumente familiare teoreticienilor corzilor, Batyrev mi-a spus într-un târziu că pentru el lucrarea noastră părea „magie neagră". Aceasta reflectă marea separare culturală între fizică și matematică, iar cum

teoria corzilor șterge frontierele, diferențele de limbaj, metodă și stil devin tot mai vizibile. Fizicienii sunt asemeni unor compozitori de avangardă, gata să încalce regulile tradiționale și să înfrunte neacceptarea doar pentru a găsi soluții. Matematicienii seamănă mai mult cu compozitorii clasici, lucrând într-un cadru mai restrâns și refuzând să facă următorul pas până când toți pașii precedenți nu sunt riguros confirmați. Fiecare abordare are avantajele și dezavantajele ei, fiecare oferă posibilități pentru descoperiri creatoare. La fel ca muzica modernă și clasică, nu există o abordare corectă și una greșită – alegerea metodelor ține în mare măsură de gust și de pregătire.

Batyrev a hotărât să construiască spațiile în oglindă folosind un cadru matematic mai convențional și a reușit. Inspirat de lucrările anterioare ale unui matematician din Taiwan, Shi-Shyr Roan, a descoperit o metodă matematică sistematică de a produce perechi de spații Calabi-Yau. Construcția sa se reduce la metoda folosită de Plesser și de mine în exemplele noastre, dar oferă un cadru mai general prezentat într-o manieră mai familiară matematicienilor.

Noutatea constă în faptul că lucrările lui Batyrev implică domenii ale matematicii pe care majoritatea fizicienilor nu le-au mai întâlnit. Eu, de exemplu, puteam sesiza fondul argumentelor sale, dar aveam mari dificultăți să înțeleg multe detalii importante. Un lucru era totuși clar: dacă metodele din lucrarea sa erau corect înțelese și aplicate, puteau deschide o nouă linie de atac asupra problemei tranzițiilor cu inversie care produc rupturi ale spațiului.

Încurajat de aceste descoperiri, pe la sfârșitul verii am hotărât să mă întorc la problema inversiilor cu toată energia de care dispuneam. Aflasem de la Morrison că urma să petreacă un an la Institutul pentru Studii Avansate și știam că și Aspinwall urma să fie acolo, primind o bursă postdoctorală. După câteva telefoane și e-mailuri am aranjat să părăsesc pentru o vreme Universitatea Cornell și să petrec și eu toamna lui 1992 la institut.

Elaborarea unei strategii

E greu de imaginat un loc mai propice concentrării intense decât Institutul pentru Studii Avansate. Fondat în 1930, este așezat într-o

zonă cu dealuri line, la marginea unei păduri idilice, la câteva mile de campusul Universității Princeton. Se spune că la institut nu poți fi distras de la muncă pentru simplul motiv că nu există nici un fel de distracții.

După părăsirea Germaniei, în 1933, Einstein a venit la institut și a rămas aici pentru tot restul vieții sale. E ușor să ni-l imaginăm lucrând la teoria unificată în această atmosferă liniștită și singuratică, aproape ascetică a institutului. În funcție de progresele pe care le înregistrezi, moștenirea unor gânduri profunde te poate stimula sau inhiba.

La scurt timp de la venirea noastră la institut, mă plimbam împreună cu Aspinwall pe Nassau Streeet (strada comercială principală a orașului Princeton) încercând să alegem un loc pentru cină. Nu era un lucru simplu, căci lui Paul îi place foarte mult carnea, iar eu sunt vegetarian. Pe când ne plimbam făcând schimb de impresii, m-a întrebat despre noutățile din domeniul la care lucram. I-am spus atunci cât de important era să se stabilească faptul că universul poate suferi tranziții cu inversie în care au loc rupturi ale spațiului. I-am prezentat strategia pe care o urmasem și speranțele puse în noua cale deschisă de lucrările lui Batyrev. Credeam că vorbesc cu un adept al teoriei și că Paul va fi entuziasmat de aceste perspective. Ei bine, m-am înșelat. Privind în urmă, îmi dau seama că reticența lui se datora în mare parte duelului nostru intelectual dintotdeauna, în care jucam pe rând rolul de avocat al diavolului față de ideile celuilalt. În câteva zile însă, și-a schimbat părerea și amândoi ne-am concentrat atenția asupra inversiilor.

Între timp a venit și Morrison și toți trei ne-am întâlnit în salonul institutului pentru a stabili strategia de acțiune. Am căzut de acord că scopul principal era să determinăm dacă evoluția de la figura 11.3 (a) la figura 11.4 (d) poate fi întâlnită în univers. Problema nu putea fi abordată direct din cauza dificultății extreme a ecuațiilor care descriu evoluția, în special când are loc și ruptura spațială. Am hotărât să reformulăm problema folosind descrierea în oglindă, în speranța că ecuațiile implicate vor fi mai ușor de abordat. Am ilustrat schematic acest lucru în figura 11.5, unde rândul superior prezintă evoluția inițială, de la figura 11.3 (a) la figura 11.4 (d), iar cel inferior prezintă aceeași evoluție din perspectiva formelor Calabi-Yau în oglindă. Reformulând în oglindă problema, fizica corzilor nu e confruntată cu nici o catastrofă. După cum se vede, nu pare să existe nici un fel de gâtuire sau ruptură în rândul de jos al figurii 11.5. Se punea însă o altă întrebare:

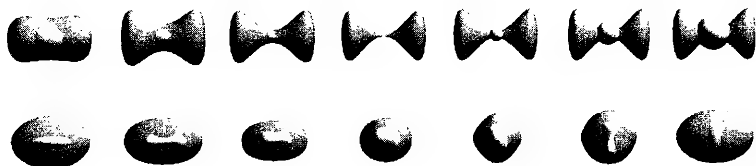


Figura 11.5 O tranziție cu inversie și ruptură a spațiului (rândul de sus) și presupusa ei reformulare în oglindă (rândul de jos).

foloseam oare simetria în oglindă dincolo de domeniul ei de aplicabilitate? Deși formele Calabi-Yau de pe ambele rânduri din extrema stângă a figurii 11.5 conduc la aceeași fizică, este oare adevărat că la fiecare pas al evoluției către partea dreaptă a figurii – care trece obligatoriu prin etapa de gâtuire-rupere-reparare din mijloc – proprietățile fizice ale perspectivei inițiale și ale celei în oglindă sunt identice?

Deși aveam motive întemeiate să credem că relația dintre spațiile pereche rămâne valabilă pentru evoluția formelor care duc la ruptură în partea de sus a figurii 11.5, ne-am dat seama ulterior că nimeni nu știe dacă formele Calabi-Yau de pe rândul de sus și de pe cel de jos al figurii 11.5 continuă să mai fie în oglindă și după producerea rupturii. Este o întrebare esențială fiindcă, dacă ele continuă să fie simetrice, atunci absența unei catastrofe în perspectiva în oglindă ar presupune absența ei și în varianta inițială, iar astfel am demonstra că în teoria corzilor spațiul se poate rupe. Am înțeles că această întrebare se poate reduce la un calcul: extragerea proprietăților fizice ale universului după producerea rupturii formei Calabi-Yau de pe rândul de sus (folosind de exemplu forma Calabi-Yau din dreapta sus în figura 11.5) și apoi pentru presupusa ei imagine în oglindă (forma Calabi-Yau din dreapta jos în figura 11.5) și compararea lor pentru a vedea dacă sunt identice.

Acesta a fost calculul căruia i-am dedicat toată energia Aspinwall, Morrison și cu mine în toamna anului 1992.

Nopți albe în ultimul cămin al lui Einstein

Glasul învăluitor, cu modulații subtile, ușor ironice, ascunde o minte extrem de ageră în cazul lui Edward Witten. E considerat succesorul

lui Einstein, cel mai mare fizician al lumii în viață. Mulți ar spune despre el că este cel mai mare fizician al tuturor timpurilor. Are un apetit insațiabil pentru problemele de avangardă ale fizicii și exercită o enormă influență în stabilirea direcțiilor de cercetare ale teoriei corzilor.

Productivitatea lui Witten e legendară. Chiara Nappi, soția lui, fizician la același institut, ni-l prezintă stând la masa din bucătărie, sondând cu mintea frontierele fizicii corzilor și luând doar din când în când creionul pentru a verifica un detaliu.[97] Un coleg mi-a spus că într-o vară a avut biroul chiar lângă cel al lui Witten. În timp ce el se chinuia cu calculele laborioase ale teoriei corzilor, auzea zgomotul continuu, ritmic al tastaturii lui Witten, care scria lucrare după lucrare despre fizica de vârf a teoriei corzilor.

La o săptămână după ce am ajuns la institut, stând de vorbă în curte, Witten m-a întrebat ce planuri de cercetare am. I-am povestit despre tranzițiile cu inversie și ruptură a spațiului și despre strategia pe care o stabilisem. S-a luminat la față, dar mi-a spus cu precauție că voi avea de efectuat calcule îngrozitor de dificile. Mi-a dezvăluit și o posibilă verigă mai slabă în strategia noastră, legată de cercetări anterioare în care colaborasem cu Vafa și Warner. Problema ridicată de el nu viza direct abordarea noastră, însă l-a făcut să se gândească la un aspect care ulterior s-a dovedit a fi complementar perspectivei noastre.

Aspinwall, Morrison și cu mine am hotărât să împărțim calculul în două etape. O primă împărțire firească putea presupune întâi extragerea proprietăților fizice asociate ultimei forme Calabi-Yau de pe rândul de sus al figurii 11.5, iar apoi repetarea operației pentru ultima formă Calabi-Yau de pe rândul de jos al figurii 11.5. Dacă relația de simetrie în oglindă nu este distrusă de ruperea formei Calabi-Yau de sus, atunci aceste două forme Calabi-Yau ar trebui să aibă proprietăți fizice identice, asemeni celor două forme Calabi-Yau inițiale din care au evoluat. (Această formulare a problemei evită calculele foarte grele rezultate în momentul ruperii formei Calabi-Yau de sus.) S-a dovedit până la urmă că determinarea proprietăților fizice asociate ultimei forme Calabi-Yau din rândul de sus este destul de simplă. Dificil era să obținem *forma precisă* a spațiului final Calabi-Yau din rândul de jos al figurii 11.5 – presupusa imagine în oglindă a formei Calabi-Yau de sus – și apoi să-i extragem proprietățile fizice.

Un procedeu pentru îndeplinirea celei de a doua sarcini – extragerea caracteristicilor fizice ale spațiului final Calabi-Yau de pe rândul

inferior, odată ce forma lui este cunoscută precis – fusese găsită cu câţiva ani în urmă de Candelas. Abordarea lui presupunea însă calcule laborioase şi ne-am dat seama că pentru a o aplica la exemplul nostru concret aveam nevoie de un program de calculator inteligent scris. Aspinwall, care pe lângă faptul că este un fizician de renume este şi un programator strălucit, s-a înhămat la această muncă. Morrison şi cu mine am trecut la îndeplinirea primei etape, adică identificarea precisă a candidatului pentru spaţiul Calabi-Yau în oglindă.

Ajunşi în acest punct, am înţeles că lucrările lui Batyrev ne-ar putea oferi indicii importante. Dar diferenţele culturale dintre matematică şi fizică – în acest caz, dintre mine şi Morrison – ne-au împiedicat să înaintăm. Era nevoie de forţele reunite ale celor două domenii pentru găsirea *formei matematice* a spaţiilor Calabi-Yau de jos care să corespundă aceluiaşi univers *fizic* al spaţiilor Calabi-Yau de sus, dacă din repertoriul naturii fac parte rupturile cu inversie. Dar nici unul din noi nu stăpânea limbajul celuilalt pentru a ne atinge scopul. Trebuia, prin urmare, să facem schimb de experienţă. Astfel, am hotărât să ne petrecem ziua ducând calculele cât mai departe cu putinţă, iar serile să învăţăm unul de la celălalt: eu urma să-i predau o oră sau două lui Morrison fizica relevantă pentru lucrarea noastră, apoi era rândul său să facă acelaşi lucru cu mine în domeniul matematicii. Cursurile noastre se terminau în general seara, după ora 11.

Zi de zi am urmat acest program. Progresul nostru era lent, însă lucrurile începuseră să se aşeze. Între timp, Witten făcea progrese semnificative în reformularea verigii slabe pe care o identificase. Munca sa consta în stabilirea unei corespondenţe mai eficiente între fizica corzilor şi matematica spaţiilor Calabi-Yau. Aspinwall, Morrison şi cu mine ne întâlneam aproape zilnic cu Witten, care ne prezenta noile lui idei. Cu trecerea săptămânilor devenea tot mai limpede că, deşi pornise de la o persepectivă diferită de a noastră, ajungea la tema tranziţiilor cu inversie. Aspinwall, Morrison şi cu mine am înţeles că, dacă nu încheiem curând calculele, Witten va rezolva problema înaintea noastră.

Bere şi muncă în weekend

Nimic nu ajută mai mult mintea unui fizician să se concentreze decât competiţia. Aspinwall, Morrison şi cu mine am apăsat pe accelera-

ţie. Dar pentru Aspinwall asta însemna cu totul altceva decât pentru Morrison şi pentru mine. Aspinwall este un ciudat amestec de rafinament aristocratic englezesc, urmare a celor zece ani petrecuţi la Oxford ca student şi apoi cercetător, şi limbaj colorat. În privinţa muncii este, cred, cel mai ordonat fizician pe care îl cunosc. Dacă mulţi dintre noi lucrăm până noaptea târziu, el nu lucrează niciodată după ora 5 după-amiaza. Dacă mulţi dintre noi lucrăm în weekend-uri, el nu lucrează niciodată. A lucra în forţă înseamnă pentru el doar ridicarea eficienţei la un nivel şi mai înalt.

Era pe la începutul lui decembrie. Morrison şi cu mine ne instruiserăm reciproc timp de mai multe luni, iar rezultatele începeau să se vadă. Eram foarte aproape de identificarea precisă a formei spaţiului Calabi-Yau pe care îl căutam. În plus, Aspinwall îşi încheiase programul şi aştepta numai rezultatul nostru care trebuia introdus în program. Era într-o noapte de joi când Morrison şi cu mine ne-am asigurat în sfârşit că ştiam să identificăm forma Calabi-Yau mult-căutată. Acest lucru se reducea şi el la o procedură simplă care necesita propriul ei program pe calculator – un program relativ simplu. Până vineri după-amiază, scrisesem programul şi eliminasem erorile de programare; vineri noaptea târziu am obţinut rezultatul.

Dar era trecut de ora 5 după-amiaza. Aspinwall plecase acasă şi urma să se întoarcă abia luni. Nu puteam face nimic fără programul său. Nici eu, nici Morrison nu puteam aştepta tot weekend-ul. Eram pe punctul de a da răspuns întrebărilor privind rupturile spaţiale din textura cosmosului, iar suspansul devenise prea greu de îndurat. L-am sunat acasă pe Aspinwall. La început a refuzat să vină a doua zi dimineaţă la lucru, aşa cum îl rugasem. Dar, după multe proteste, a consimţit să ni se alăture, cu condiţia să-i cumpărăm şase beri. Am acceptat.

Momentul adevărului

Ne-am întâlnit cu toţii sâmbătă dimineaţa la institut, aşa cum hotărâsem. Era o zi însorită şi atmosfera era relaxată. Eu unul mă temeam că Aspinwall nu va veni, dar, când şi-a făcut apariţia, timp de un sfert de oră l-am ridicat în slăvi pentru acest prim weekend petrecut la birou. M-a asigurat că era prima şi ultima dată.

Ne-am strâns cu toții în jurul calculatorului lui Morrison. Aspinwall i-a explicat cum să pornească programul și ne-a arătat forma precisă pe care trebuiau s-o aibă datele de intrare. Morrison a introdus rezultatele obținute de noi în noaptea precedentă și eram gata să pornim programul.

În mare, calculele pe care urma să le facem se reduceau la determinarea masei anumitor specii de particule – un anumit mod de vibrație al corzii – când acestea se mișcau printr-un univers a cărui componentă Calabi-Yau reușisem s-o identificăm. Conform strategiei noastre, speram ca această masă să fie identică cu cea calculată pentru forma Calabi-Yau rezultată în urma tranziției cu inversie și ruptură a spațiului. Ultimul calcul era relativ ușor și îl efectuaserăm cu săptămâni în urmă; răspunsul era 3, în unitățile pe care le foloseam noi. Din moment ce efectuam calculele numerice corespunzătoare imaginii în oglindă pe un computer, ne așteptam să obținem un rezultat de genul 3,000001 sau 2,999999, foarte aproape de 3, dar nu exact 3, din cauza erorilor de rotunjire.

Morrison stătea la calculator gata să apese pe tasta de pornire. Cum tensiunea creștea, a spus: „Îi dăm drumul!" și a pornit programul. În câteva secunde, calculatorul ne-a dat răspunsul: 8,999999. Mi s-au muiat picioarele. Oare tranzițiile cu inversie distrug relațiile în oglindă, ceea ce arată probabil că ele nu se pot produce? Dar imediat am înțeles cu toții că se petrecea ceva ciudat. Dacă ar fi existat o reală nepotrivire între proprietățile fizice ale celor două forme, ar fi fost foarte puțin probabil ca rezultatul calculatorului să fie atât de aproape de un număr întreg. Dacă ideile noastre erau greșite, nu puteam să ne așteptăm decât la un șir de cifre aleatoare. Obținuserăm un răspuns greșit, dar poate că acesta sugera că făcuserăm o simplă greșeală de aritmetică. Aspinwall și cu mine ne-am dus la tablă și imediat am descoperit greșeala: pierduserăm un factor 3 în calculul „relativ ușor" pe care îl făcuserăm cu săptămâni în urmă; adevăratul rezultat era 9. Răspunsul calculatorului era deci exact ce ne doream.

Acest acord *post factum* nu era decât în parte convingător. Când știi deja răspunsul pe care ți-l dorești, este adesea foarte simplu să găsești o cale de a-l obține. Ne trebuia alt exemplu. Cum toate programele de care aveam nevoie erau scrise, acest lucru nu era complicat. Am calculat masa altei particule a formei Calabi-Yau de pe rândul de sus, fiind foarte atenți de această dată să nu facem greșeli. Am obținut rezultatul 12. Ne-am adunat din nou în jurul calculatorului și l-am pus la treabă. După câteva secunde am primit răspunsul:

11,999999. *Confirmare.* Demonstrasem că presupusa imagine în oglindă este într-adevăr imaginea în oglindă, deci tranziţiile cu inversie şi ruptura spaţiului fac parte din fizica teoriei corzilor.

În acel moment am sărit de pe scaun şi am făcut o tură victorioasă prin birou. Morrison exulta din spatele calculatorului. Reacţia lui Aspinwall a fost însă uşor diferită: „E grozav, dar ştiam că o să meargă", a spus el calm. „Şi berea mea unde e?"

Abordarea lui Witten

Luni ne-am dus triumfători la Witten şi i-am povestit despre succesul nostru. Era foarte mulţumit de rezultat. La rândul lui, tocmai găsise o cale de a demonstra că tranziţiile cu inversie au loc în teoria corzilor. Raţionamentul lui era foarte diferit de al nostru şi lămurea de ce rupturile spaţiale nu au consecinţe catastrofale.

Abordarea lui subliniază diferenţele dintre o teorie a particulelor punctiforme şi teoria corzilor în cazul unor asemenea rupturi. Diferenţa fundamentală este că există două tipuri de mişcări ale corzii în apropierea rupturii şi doar un singur tip de mişcare a particulei punctiforme. Mai precis, coarda se poate deplasa adiacent rupturii, asemenea particulei punctiforme, dar poate să şi înconjoare ruptura când se deplasează înainte, aşa cum e ilustrat în figura 11.6. În esenţă, analiza lui Witten arată cum corzile care înconjoară o ruptură – ceea ce nu

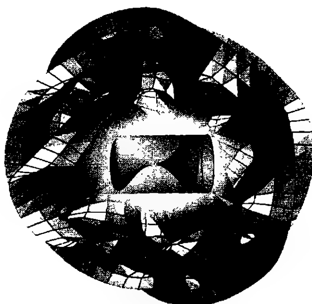


Figura 11.6 Foaia de univers măturată de o coardă creează un scut care anulează posibilele efecte catastrofale asociate cu ruptura texturii spaţiului.

se poate întâmpla în teoria particulelor punctiforme – protejază universul înconjurător de efectelor catastrofale care altminteri ar apărea. Este ca și cum foaia de univers a corzii – să ne amintim din capitolul 6 că e vorba de suprafața bidimensională pe care coarda o mătură în deplasarea ei prin spațiu – ar oferi o barieră protectoare care anulează aspectele dezastruoase ale degenerării geometrice a texturii spațiului.

Am putea să ne întrebăm ce s-ar întâmpla dacă s-ar produce o ruptură, iar în vecinătatea ei n-ar exista nici o coardă care s-o protejeze. Mai mult, ne-am putea teme că, în cazul unei rupturi, coarda – o buclă infinit de subțire – ar constitui o barieră total ineficientă. Răspunsul la ambele obiecții se bazează pe o trăsătură fundamentală a mecanicii cuantice dată de Feynman. Un obiect, indiferent dacă este particulă sau coardă, se deplasează de la un punct la altul „adulmecând" toate traiectoriile posibile. Mișcarea rezultată care se observă este o combinație a *tuturor* posibilităților, iar contribuția relativă a fiecărei traiectorii posibile este determinată cu precizie de formulele matematice ale mecanicii cuantice. Dacă s-ar produce o ruptură în textura spațiului, atunci printre traiectoriile posibile ale corzilor care se deplasează ar fi și acelea care înconjoară ruptura, traiectorii asemenea celei din figura 11.6. Chiar dacă nu par să existe corzi lângă ruptură în momentul producerii ei, mecanica cuantică ia în considerare efectele fizice ale tuturor traiectoriilor posibile ale corzilor, iar printre acestea există multe drumuri protectoare (de fapt, un număr infinit) care înconjoară ruptura. Witten a arătat că acestea sunt contribuțiile care anulează catastrofa cosmică pe care ruptura ar produce-o.

În ianuarie 1993, Witten și noi trei ne-am lansat simultan lucrările pe internet, o cale prin care articolele de fizică pot fi la dispoziția oricui, oriunde în lume. Cele două lucrări prezentau, din perspective total diferite, primele exemple de *tranziții cu schimbarea topologiei* – termenul de specialitate pentru procesele de ruptură a spațiului pe care le descoperisem. Întrebarea privind posibilitatea ruperii texturii spațiului își găsise un răspuns cantitativ prin teoria corzilor.

Consecințe

Știm acum că rupturile spațiale se pot produce fără a avea urmări fizice catastrofale. Dar *ce* se întâmplă când textura spațială se sfâșie? Care

sunt consecințele observabile? Am văzut că multe proprietăți ale lumii din jurul nostru depind de structura detaliată a dimensiunilor încolăcite. Astfel, am putea crede că transformarea destul de violentă care leagă un spațiu Calabi-Yau de celălalt, conform figurii 11.5, ar avea un impact fizic semnificativ. De fapt, desenele cu mai puține dimensiuni pe care le folosim pentru a vizualiza spațiul fac ca transformarea să pară ceva mai complicată decât este în realitate. Dacă am putea vizualiza o geometrie hexadimensională, am observa că spațiul se rupe, dar acest lucru se produce într-un mod delicat. Seamănă mai curând cu o gaură făcută de molii în lână decât cu un genunchi care iese printr-un pantalon rupt.

Lucrarea noastră și cea a lui Witten demonstrează că trăsăturile fizice cum ar fi numărul de familii de corzi vibrante și tipurile de particule din cadrul fiecărei familii nu sunt afectate de aceste procese. Când spațiul Calabi-Yau suferă o ruptură, ceea ce se poate modifica sunt valorile precise ale maselor particulelor individuale – energiile posibilelor moduri de vibrație ale corzii. Lucrările noastre au arătat că aceste mase variază continuu ca urmare a schimbării formei geometrice a componentei Calabi-Yau a spațiului, unele crescând, altele scăzând. Esențial e faptul că nu există salturi catastrofale sau vreun alt comportament neobișnuit al acestor mase variabile în timpul rupturii. Din punctul de vedere al fizicii, momentul rupturii nu are caracteristici distinctive.

Aceasta ridică două probleme. Mai întâi, ne-am concentrat asupra rupturilor care au loc în textura spațială a componentei suplimentare hexadimensionale Calabi-Yau a universului. Oare asemenea rupturi pot avea loc și în cele trei dimensiuni spațiale extinse familiare nouă? Răspunsul este, aproape sigur, da. Spațiul e spațiu, indiferent dacă e strâns încolăcit într-o formă Calabi-Yau sau extins la scara universului observabil în nopțile senine. De fapt, am văzut deja că dimensiunile spațiale familiare pot fi și ele încolăcite sub forma unor gigantice curbe închise, iar distincția între dimensiunile încolăcite și cele neîncolăcite e oarecum artificială. Deși analiza noastră și a lui Witten se bazează pe trăsăturile matematice specifice formelor Calabi-Yau, rezultatul nostru – faptul că textura spațiului se poate rupe – se aplică fără îndoială unui domeniu mai larg.

În al doilea rând, este oare posibil ca o asemenea ruptură cu schimbare de topologie să aibă loc azi sau mâine? E posibil să fi avut loc în trecut? Da. Măsurătorile experimentale ale maselor particulelor

elementare arată că valorile acestora sunt destul de stabile de-a lungul timpului. Dar dacă ne întoarcem la epocile imediat următoare big bang-ului, chiar şi teoriile nebazate pe corzi invocă perioade importante în cursul cărora masele particulelor elementare s-au schimbat de-a lungul timpului. Din perspectiva teoriei corzilor, în aceste perioade, în mod cert au avut loc rupturile cu schimbarea topologiei prezentate în capitolul de faţă. Apropiindu-ne de prezent, stabilitatea observată a maselor particulelor elementare arată că, dacă în prezent universul suferă o ruptură spaţială cu schimbarea topologiei, atunci acesta se petrece extrem de lent, atât de lent, încât efectele asupra maselor particulelor elementare sunt prea mici pentru aparatura experimentală de care dispunem. Prin urmare, dacă această condiţie e îndeplinită, nu e exclus ca universul nostru să se afle chiar acum în toiul unei rupturi spaţiale. Dacă s-ar petrece suficient de lent, nici măcar nu am şti că are loc. Acesta este unul din rarele cazuri din fizică în care absenţa unor fenomene observabile izbitoare e un semn de bun-augur. Absenţa unor consecinţe dezastruoase observabile într-o asemenea evoluţie geometrică neobişnuită arată cât de mult a depăsit teoria corzilor previziunile lui Einstein.

CAPITOLUL 12

Dincolo de corzi: în căutarea teoriei M

În lunga sa căutare a unei teorii unificate, Einstein a ajuns să se întrebe dacă „Dumnezeu ar fi putut face universul în alt fel; cu alte cuvinte, dacă necesitatea simplității logice este chiar atât de strictă“[98]. Prin această remarcă, Einstein a formulat pentru prima dată un punct de vedere împărtășit acum de numeroși fizicieni: dacă există o teorie finală a naturii, unul din cele mai convingătoare argumente în favoarea formei sale particulare ar fi acela că teoria nu poate arăta altfel. Teoria ultimă trebuie să ia forma pe care o are pentru că aceasta e unicul cadru explicativ capabil să descrie universul fără contradicții interne sau absurdități logice. O asemenea teorie ar afirma că lucrurile sunt așa cum sunt pentru ca așa *trebuie* să fie. Orice schimbare, oricât de mică, ar conduce la o teorie care – la fel ca fraza „Această propoziție este o minciună“ – poartă în germeni propria sa distrugere.

Stabilirea caracterului inevitabil al structurii universului ne-ar apropia de un răspuns la cele mai profunde întrebări. Aceste întrebări subliniază misterul care înconjoară un șir aparent infinit de alegeri implicate în alcătuirea universului nostru. Caracterul inevitabil răspunde la aceste întrebări eliminând opțiunile. Inevitabilitate înseamnă că, de fapt, nu există opțiuni. Inevitabilitatea afirmă că universul nu putea fi altfel. După cum vom vedea în capitolul 14, nimic nu ne asigură că universul are o construcție atât de strictă. Și totuși, căutarea unei asemenea rigidități în legile naturii se află în centrul programului de unificare a fizicii moderne.

La sfârșitul anilor ’80, fizicienii au înțeles că, deși se apropiase de o descriere unitară a universului, teoria corzilor nu își putea atinge scopul. Și aceasta din două motive. În primul rând, după cum am

menționat pe scurt în capitolul 7, fizicienii și-au dat seama că există de fapt *cinci* versiuni diferite ale teoriei corzilor. Numele lor erau: Tipul I, Tipul IIA, Tipul IIB, Heterotic O(32) (prescurtat Heterotic O) și Heterotic E8 × E8 (prescurtat Heterotic-E). Toate aceste teorii au aceleași trăsături fundamentale – modurile lor de vibrație determină valorile pe care le pot lua masele și sarcinile de forță, necesită 10 dimensiuni spațio-temporare, dimensiunile lor încolăcite trebuie să ia una din formele Calabi-Yau etc. – și din acest motiv în capitolele precedente nu ne-au preocupat diferențele dintre ele. Totuși, cercetările din anii '80 au arătat că ele într-adevăr diferă. Puteți citi mai multe despre proprietățile lor în notele de la sfârșitul cărții, dar e suficient să știți că ele diferă atât prin felul în care încorporează supersimetria, cât și prin anumite detalii importante ale modurilor de vibrație.[99] (De exemplu teoria corzilor de Tipul I conține și corzi deschise, deci cu două capete libere, în plus față de buclele închise de care ne-am ocupat până acum.) Era un lucru stânjenitor pentru teoreticienii corzilor fiindcă, deși e impresionant să propui o teorie unificată, existența a cinci propuneri o subminează pe fiecare în parte.

Cea de-a doua abatere de la caracterul inevitabil e mai subtilă. Pentru a înțelege acest lucru, trebuie să facem observația că toate teoriile fizice constau din două părți. Prima parte este ansamblul ideilor fundamentale ale teoriei, exprimate de obicei prin ecuații matematice. Cea de-a doua parte conține soluțiile acestor ecuații. În general, unele ecuații au o singură soluție, în timp ce altele au mai multe soluții (eventual foarte multe soluții). (Ca să dau un exemplu simplu, ecuația „2 înmulțit cu un număr face 10" are o singură soluție: 5. Pe de altă parte, ecuația „0 înmulțit cu un număr face 0" are o infinitate de soluții, deoarece 0 înmulțit cu orice număr face tot 0.) Și astfel, chiar dacă cercetările conduc la o teorie unică, bazată pe un set unic de ecuații, caracterul inevitabil este totuși compromis dacă aceste ecuații au mai multe soluții. La sfârșitul anilor '80 s-a dovedit că teoria corzilor se află într-o asemenea situație. Când fizicienii au studiat ecuațiile celor cinci teorii ale corzilor, și-au dat seama că fiecare dintre ele are mai multe soluții – de exemplu, existau mai multe posibilități de a încolăci dimensiunile suplimentare – fiecare dintre soluții corespunzând unui univers cu proprietăți diferite. Majoritatea acestor universuri, deși apăreau ca soluții corecte ale ecuațiilor din teoriile corzilor, nu aveau nici o legătură cu ceea ce cunoaștem noi despre lumea înconjurătoare.

Aceste abateri de la inevitabilitate ar putea părea trăsături fundamentale nedorite ale teoriei corzilor. Dar cercetările începute pe la mijlocul anilor '90 ne-au făcut să sperăm că aceste trăsături pot fi doar rezultatul felului în care fizicienii analizau teoria. Pe scurt, ecuațiile teoriei corzilor sunt atât de complicate, încât nimeni nu le cunoaşte forma exactă. Fizicienii au reuşit să scrie numai versiuni aproximative ale acestor ecuații. Iar tocmai aceste ecuații aproximative fac ca teoriile să difere semnificativ între ele. Şi tot aceste ecuații aproximative, în contextul fiecăreia din cele cinci teorii ale corzilor, sunt sursa a nenumărate soluții, un adevărat corn al abundenței din care izvorăsc universuri nedorite.

Din 1995 (începutul celei de-a doua revoluții a supercorzilor) au apărut tot mai multe dovezi că ecuațiile exacte, a căror formă precisă ne este imposibil s-o determinăm, ar putea rezolva această problemă, ceea ce ar da teoriei corzilor amprenta caracterului inevitabil. De fapt se demonstrase deja, spre satisfacția teoreticienilor corzilor, că, atunci când vor fi înțelese ecuațiile exacte, ele vor dovedi că toate cele cinci teorii ale corzilor sunt intim legate. La fel ca brațele unei stele de mare, ele aparțin unei aceleiaşi entități. Fizicienii sunt acum convinşi că, în loc de cinci teorii diferite, au de-a face cu o *singură* teorie care le uneşte pe cele cinci într-un cadru teoretic unic. Şi, la fel cum se limpezesc lucrurile când relații ascunse sunt dezvăluite, această unificare oferă o nouă perspectivă pentru înțelegerea universului prin teoria corzilor.

Pentru a explica aceste idei, va trebui să urmărim cercetările de vârf din teoria corzilor. Va trebui să înțelegem natura aproximațiilor folosite în teoria corzilor şi limitările lor inerente. Va trebui să ne familiarizăm cu tehnicile subtile – numite *dualități* – introduse de fizicieni pentru a evita unele aproximații. Apoi vom urmări raționamentele care folosesc aceste tehnici pentru a ajunge la ideile menționate mai sus. Dar nu vă faceți griji. Teoreticienii corzilor au făcut deja munca cea mai grea, iar nouă nu ne rămâne decât să explicăm rezultatele lor.

Totuşi, din moment ce trebuie să urmărim mai multe fragmente aparent disparate, iar apoi să le asamblăm, există riscul să nu vedem pădurea din cauza copacilor. Astfel, dacă parcurgând acest capitol la un moment dat discuția vi se va părea prea complicată şi veți simți nevoia să săriți la alte capitole, reveniți la secțiunea care urmează şi în care am rezumat ideile esențiale ale celei de-a doua revoluții a supercorzilor.

Un rezumat al celei de-a doua revoluții din teoria supercorzilor

Cea mai importantă descoperire a celei de-a doua revoluții din teoria supercorzilor este rezumată de figurile 12.1 și 12.2. Figura 12.1 prezintă situația înainte ca fizicienii să poată depăși metodele de aproximație folosite la început. Se credea că cele cinci teorii erau complet separate. Noile descoperiri arată însă că toate teoriile corzilor, asemeni brațelor unei stele de mare (figura 12.2), trebuie privite ca un cadru unic, atotcuprinzător. (De fapt, la sfârșitul acestui capitol vom vedea că apare și o a șasea teorie – un al șaselea braț.) Acest cadru vast a primit, din motive ce vor fi lămurite mai jos, numele provizoriu de teoria M. Figura 12.2 reprezintă un rezultat crucial în încercarea de-a ajunge la o teorie ultimă. În teoria corzilor, fire aparent disparate au fost țesute într-o singură tapiserie – o unică și atotcuprinzătoare teorie care ar putea fi mult căutata teorie despre tot.

Deși mai sunt încă multe de făcut, două caracteristici esențiale ale teoriei M au fost deja puse în evidență. Prima este că teoria M are *unsprezece* dimensiuni (zece spațiale și una temporală). Așa cum Kaluza a descoperit că o dimensiune spațială suplimentară permite contopirea teoriei generale a relativității cu electromagnetismul, teoreticienii corzilor și-au dat seama că o dimensiune spațială suplimentară în teoria corzilor – pe lângă cele nouă dimensiuni spațiale și una temporală din capitolele precendente – permite o sinteză a celor cinci

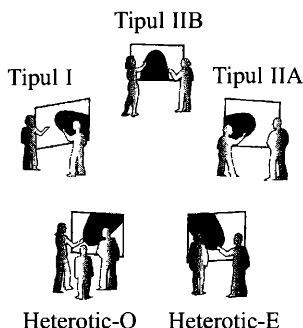


Figura 12.1 Vreme de mai mulți ani, fizicienii care lucrau în cele cinci teorii ale corzilor credeau că au de-a face cu teorii complet separate.

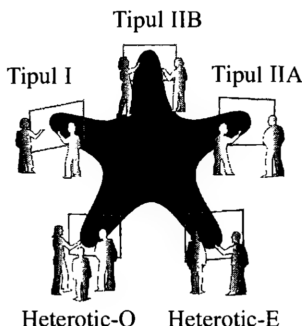


Figura 12.2 Rezultatele celei de-a doua revoluţii a supercorzilor au arătat că toate cele cinci teorii ale corzilor sunt de fapt părţi ale unui cadru unificat numit teoria M.

versiuni ale teoriei. Mai mult, această dimensiune spaţială suplimentară nu e o soluţie ad hoc; teoreticienii au înţeles că raţionamentele din anii '70 şi '80 care au condus la o dimensiune temporală şi nouă dimensiuni spaţiale erau *aproximative*, iar calcule exacte, care pot acum fi efectuate, arată că o dimensiune spaţială fusese scăpată din vedere.

A doua caracteristică a teoriei M care a fost descoperită este aceea că, pe lângă corzi vibrante, ea mai conţine şi alte obiecte: membrane vibrante bidimensionale, bule tridimensionale care se unduiesc (numite „tri-brane") şi o mulţime de alte ingrediente. La fel ca în cazul celei de-a unsprezecea dimensiuni, această trăsătură a teoriei M a apărut, la mijlocul anilor '90, odată cu depăşirea aproximaţiilor.

Dincolo de toate acestea şi de alte descoperiri făcute în ultimii ani, natura teoriei M rămâne un mister – iată şi una din semnificaţiile literei „M". Fizicienii din lumea întreagă se străduiesc să ajungă la înţelegerea completă a teoriei M, care ar putea deveni problema centrală a fizicii secolului XXI.

O metodă de aproximaţie

Limitele metodelor folosite de fizicieni în analiza teoriei corzilor ţin de ceea ce se numeşte *teoria perturbaţiilor*. Teoria perturbaţiilor presupune efectuarea unei aproximaţii pentru a obţine în linii mari

soluția unei probleme, iar apoi îmbunătățirea sistematică a acestei aproximații luând în considerare detaliile inițial ignorate. Acest procedeu joacă un rol important în multe domenii ale cercetării științifice, a fost un element esențial în înțelegerea teoriei corzilor și, așa cum vom vedea imediat, e întâlnit frecvent chiar și în viața de zi cu zi.

Imaginați-vă că într-o bună zi mașina începe să vă facă probleme și o duceți la mecanic pentru revizia tehnică. După prima verificare, mecanicul vă dă o veste proastă. Mașina are nevoie de un bloc motor nou care, împreună cu mâna de lucru, vă duce la un preț în jurul a 900 de dolari. Aceasta e însă numai o primă aproximație care te aștepți să fie modificată pe măsură ce vor fi cunoscute mai multe detalii legate de reparație. Câteva zile mai târziu, după ce a avut timp să supună mașina la diferite teste, mecanicul dă o estimare mai precisă, 950 de dolari. El vă spune că mai aveți nevoie și de un regulator care împreună cu componentele și cu manopera ajunge la 50 de dolari. În fine, când vă duceți să vă ridicați mașina, el a însumat toate cheltuielile și vă pune în față o notă de plată de 987,93 dolari. Aceasta, explica el, include cei 950 $ pentru blocul motor și pentru regulator, 27 $ pentru o curea de transmisie, 10 $ pentru un cablu de baterie și 0,93 $ pentru un șurub cu izolație electrică. Prima cifră aproximativă de 900 de dolari a fost rafinată prin includerea tot mai multor detalii. În limbajul fizicii, aceste detalii sunt numite *perturbații* la estimarea inițială.

Când teoria perturbațiilor e aplicată corect și eficient, estimarea inițială e destul de apropiată de răspunsul final; odată încorporate, detaliile de finețe ignorate în estimarea inițială vor aduce modificări mici la rezultatul final. Uneori însă, când mergi să plătești, constați că factura diferă mult de estimarea inițială. Chiar dacă atunci ești tentat să folosești alți termeni, tehnic vorbind avem de-a face doar cu un *eșec al teoriei perturbațiilor*. Aceasta înseamnă că aproximația inițială nu a fost o evaluare bună a răspunsului final pentru că „rafinările", în loc să producă mici modificări, conduc la schimbări mari ale estimării în linii mari.

Prezentarea făcută până acum teoriei corzilor s-a bazat pe o abordare perturbativă, oarecum asemănătoare celei folosite de mecanic. „Înțelegerea incompletă" a teoriei corzilor pe care am menționat-o din când în când își are radăcinile în această metodă aproximativă. Putem înțelege această remarcă importantă prezentând teoria perturbațiilor într-un context mai puțin abstract decât teoria corzilor, dar mai apropiat de problema noastră decât exemplul mecanicului.

Un exemplu clasic de teoria perturbaţiilor

Înţelegerea mişcării Pământului în sistemul solar ne oferă un exemplu clasic de utilizare a teoriei perturbaţiilor. La scara distanţelor interplanetare, singura forţă care trebuie luată în considerare în calculul mişcării copurilor este forţa gravitaţională. Ecuaţiile de mişcare sunt însă atât de complicate, încât trebuie să recurgem la aproximaţii. Amintiţi-vă că atât teoria lui Newton, cât şi teoria lui Einstein afirmă că orice obiect exercită o influenţă gravitaţională asupra oricărui alt obiect, ceea ce face ca, în sistemul solar să se ajungă la o competiţie gravitaţională complexă, imposibil de tratat matematic, între Pământ, Soare, Lună, celelalte planete şi, în principiu, toate celelalte corpuri cereşti. După cum vă daţi seama, nu este cu putinţă să luăm în considerare toate aceste influenţe şi să determinăm traiectoria exactă a Pământului. De fapt, chiar şi în cazul a trei corpuri cereşti ecuaţiile sunt atât de complicate, încât nimeni nu a fost în stare până acum să le rezolve complet.[100]

Putem totuşi prezice mişcarea Pământului în sistemul solar cu mare precizie folosind metoda perturbaţiilor. Masa enormă a Soarelui, în comparaţie cu masele celorlalţi membri ai sistemului solar, şi apropierea acestuia de Pământ, în comparaţie cu distanţa faţă de celelalte stele din univers, fac ca Soarele să exercite de departe cea mai puternică influenţă asupra mişcării Pământului. Şi astfel, prima estimare constă în a lua în considerare numai influenţa Soarelui asupra mişcării Pământului. Pentru multe scopuri această estimare este perfect valabilă. Dacă e însă necesar, putem rafina această aproximaţie prin includerea treptată a efectelor gravitaţionale ale celor mai apropiate corpuri relevante, cum ar fi Luna şi alte planete care trec prin apropiere în acel moment. Calculele vor deveni din ce în ce mai dificile odată ce reţeaua de influenţe gravitaţionale devine mai complexă, dar acest lucru nu trebuie să ascundă esenţa metodei. Interacţia gravitaţională dintre Soare şi Pământ oferă o explicaţie aproximativă pentru mişcarea Pământului, în timp ce complexul celorlalte influenţe gravitaţionale oferă un şir de rafinări din ce în ce mai puţin importante.

Abordarea perturbativă funcţionează în acest exemplu pentru că există o influenţă fizică dominantă care permite o descriere teoretică relativ simplă. Dar acest lucru nu se întâmplă întotdeauna. De exemplu, dacă ne interesează mişcarea a trei stele de mase comparabile care

alcătuiesc un sistem trinar, nu există o singură relație gravitațională a cărei influență să le umbrească pe celelalte. Prin urmare, nu există o singură interacție dominantă care să ofere o estimare globală, iar celelalte efecte să producă doar micile rafinări. Dacă am încerca să folosim abordarea perturbativă izolând, de exemplu, atracția gravitațională dintre două stele şi folosind-o apoi pentru a determina aproximația noastră inițială, am observa imediat că abordarea noastră eşuează. Calculele ar demonstra că „rafinarea" mişcării prezise prin includerea celei de-a treia stele *nu este mică*, ci este de fapt la fel de semnificativă ca presupusa estimare inițială. Iată un exemplu elocvent: mişcarea a trei oameni prinşi în horă nu seamănă deloc cu cea a doi oameni care dansează tango. O rafinare prea mare înseamnă că aproximația inițială a fost incorectă şi toată construcția noastră e un castel din cărți de joc. Problema nu e doar că trebuie inclusă o rafinare substanțială datorată celei de-a treia stele. Este un efect de domino: rafinarea substanțială are un impact mare asupra mişcării celorlalte două stele, care la rândul lor au o mare influență asupra mişcării celei de-a treia stele, care apoi are un impact mare asupra celorlalte două şi aşa mai departe. Toate firele din țesătura gravitațională sunt la fel de importante şi trebuie luate în considerare simultan. Deseori, în aceste cazuri, singura cale este să folosim puterea brută a calculatoarelor pentru a simula mişcarea rezultată.

Acest exemplu arată cât de important e în abordarea perturbativă să determinăm dacă presupusa estimare în linii mari *este* corectă şi, dacă este, care şi câte dintre detaliile de finețe trebuie incluse pentru a obține nivelul de precizie dorit. Aceste probleme au importanță deosebită pentru aplicarea metodelor perturbative la procesele fizice din lumea microscopică.

O abordare perturbativă a teoriei corzilor

Procesele fizice din teoria corzilor apar din interacțiile elementare între corzile vibrante. După cum am văzut spre sfârşitul capitolului 6,* aceste interacții implică despărțirea şi alăturarea buclelor corzilor,

* Pentru cititorii care au sărit peste secțiunea „Un răspuns mai precis" din capitolul 6 ar putea fi folositoare răsfoirea părții de început a acestei secțiuni. (*N. a.*)

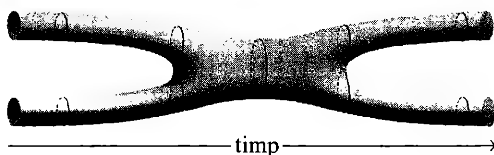


Figura 12.3 Corzile interacţionează unindu-se şi despărţindu-se.

ca în figura 6.7, pe care o reproducem în figura 12.3. Teoreticienii corzilor au demonstrat cum se poate asocia o formulă matematică precisă schemei din figura 12.3, formulă care exprimă influenţa fiecărei corzi incidente asupra mişcării rezultante a celeilalte corzi. (Detaliile formulei diferă în cele cinci teorii, dar deocamdată vom ignora aceste subtilităţi.) Dacă n-ar exista mecanica cuantică, această formulă ar descrie complet interacţia corzilor. Dar agitaţia microscopică dictată de principiul de incertitudine spune că perechi coardă/anticoardă (două corzi cu moduri de vibraţie opuse) pot apărea în orice moment, împrumutând energie din univers, cu condiţia să se anihileze reciproc suficient de repede pentru a restitui împrumutul energetic. Asemenea perechi de corzi, născute din agitaţia cuantică, dar care trăiesc pe seama energiei împrumutate şi deci trebuie să se recombine imediat într-o singură buclă, sunt cunoscute sub numele de *perechi de corzi virtuale*. Chiar dacă e de scurtă durată, prezenţa acestor perechi de corzi virtuale suplimentare influenţează proprietăţile detaliate ale interacţiei.

Acest lucru e ilustrat schematic în figura 12.4. Cele două corzi iniţiale se lovesc una de alta în punctul marcat prin (a), unde se unesc într-o singură buclă. Această buclă se deplasează puţin, dar în (b) fluctuaţiile agitaţiei cuantice duc la apariţia unei perechi de corzi virtuale,

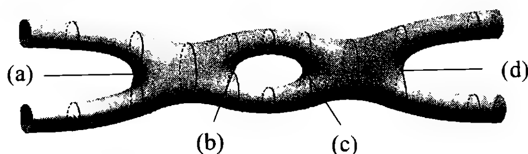


Figura 12.4 Agitaţia cuantică poate provoca apariţia (b) sau dispariţia (c) unei perechi coardă/anticoardă, ceea ce face ca interacţia să fie mai complicată.

care se anihilează apoi în (c), rezultând din nou o singură coardă. În final, în (d), această coardă își cedează energia disociindu-se într-o pereche de corzi care pornesc în direcții noi. Datorită buclei din centrul figurii 12.4, fizicienii numesc această interacție proces cu „o buclă“. La fel ca în cazul interacției ilustrate în figura 12.3, o formulă matematică precisă poate fi asociată cu această diagramă pentru a exprima efectul perechii de corzi virtuale asupra mișcării celor două corzi inițiale.

Dar lucrurile nu se încheie aici, pentru că agitația cuantică poate provoca oricât de multe erupții instantanee de corzi virtuale, producând un șir de perechi de corzi virtuale. Astfel apar diagrame cu tot mai multe bucle, după cum se vede în figura 12.5. Fiecare din aceste diagrame oferă un mijloc simplu de descriere a proceselor fizice implicate: corzile incidente fuzionează, agitația cuantică face ca bucla rezultată să se desfacă într-o pereche de corzi virtuale, acestea se deplasează mai departe și apoi se anihilează reciproc unindu-se într-o singură buclă, care se deplasează și produce o altă pereche de corzi virtuale și așa mai departe. În privința celorlalte diagrame, există o formulă matematică pentru fiecare proces în parte, formulă ce rezumă efectul asupra mișcării perechii de corzi incidente.[101]

La fel ca mecanismul care în nota de plată finală și-a îmbunătățit estimarea inițială de 900 de dolari adăugând 50, 27, 10 și 0,93 dolari și la fel cum am ajuns la înțelegerea mai exactă a mișcării Pământului adăugând la influența Soarelui efectele mai mici ale Lunii și ale altor planete, teoreticienii corzilor au demonstrat că putem înțelege interacția

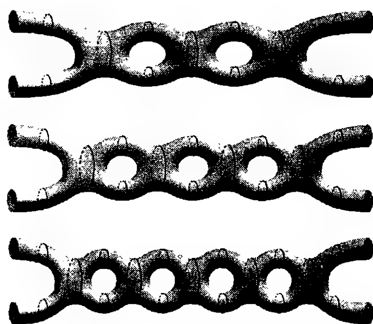


Figura 12.5 Agitația cuantică poate duce la crearea și anihilarea a numeroase șiruri de perechi coardă/anticoardă.

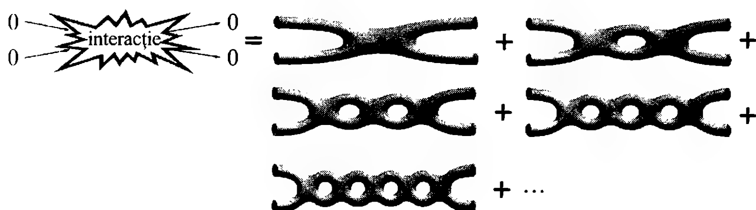


Figura 21.6 Influența netă pe care fiecare coardă incidentă o are asupra celeilalte provine din însumarea influențelor care implică diagrame cu tot mai multe bucle.

dintre două corzi însumând expresiile matematice ale diagramelor fără bucle (fără perechi de corzi virtuale), cu o buclă (o pereche de corzi virtuale), cu două bucle (două perechi de corzi virtuale) și așa mai departe, după cum e ilustrat în figura 12.6.

Un calcul exact necesită însumarea tuturor expresiilor matematice asociate fiecăreia dintre aceste diagrame, cu un număr tot mai mare de bucle. Dar, cum există un număr infinit de asemenea diagrame și cum calculele matematice asociate lor cresc în dificultate odată cu creșterea numărului de bucle, sarcina se dovedește a fi imposibilă. Ca urmare, teoreticienii corzilor au atacat problema prin metoda perturbațiilor, bazându-se pe presupunerea că o estimare globală rezonabilă e dată de procesele fără bucle, iar diagramele care conțin bucle duc doar la rafinări tot mai mici, pe măsură ce numărul buclelor crește.

De fapt, aproape tot ce știm despre teoria corzilor – majoritatea lucrurilor despre care am vorbit în capitolele precedente – a fost descoperit de fizicieni prin calcule laborioase și detaliate care folosesc această abordare perturbativă. Dar pentru a avea încredere în precizia rezultatelor obținute trebuie să aflăm dacă e valabilă aproximația care include doar primele câteva diagrame din figura 12.6. Ajungem astfel la întrebarea crucială: cât de bună e estimarea noastră?

Cât de corectă e estimarea?

Depinde. Deși formula matematică asociată fiecărei diagrame devine din ce în ce mai complicată odată cu creșterea numărului de bucle, teoreticienii corzilor au observat o trăsătură simplă și esențială. Oarecum

asemănătoare modului în care rezistența unei funii determină probabilitatea ca aceasta să se rupă în două când tragi de ea sau o scuturi violent, există un număr care determină probabilitatea ca fluctuațiile cuantice să provoace separarea unei corzi în două, rezultând de aici pentru scurt timp o pereche de corzi virtuale. Acest număr poartă numele de *constantă de cuplaj a corzii* (de fapt, fiecare dintre cele cinci teorii ale corzilor are propria ei constantă de cuplaj, după cum vom vedea în curând). Numele este foarte sugestiv: mărimea constantei de cuplaj a corzii ne arată cât de puternic sunt corelate agitațiile cuantice a trei corzi (bucla inițială și cele două bucle în care aceasta se desface) – altfel spus, cât de strâns sunt *cuplate* între ele. Calculele ne arată că, cu cât este mai mare constanta de cuplaj a corzii, cu atât este mai probabil ca agitația cuantică să provoace separarea în două a corzii inițiale (și apoi reunirea celor două corzi), iar cu cât este mai mică constanta de cuplaj a corzii, cu atât e mai puțin probabil ca asemenea corzi virtuale să apară.

Vom ajunge în curând la determinarea valorii constantei de cuplaj a corzii pentru fiecare dintre cele cinci teorii, dar mai întâi să stabilim ce se înțelege prin „mic" sau „mare" atunci când îi estimăm valoarea? Matematica pe care se bazează corzile arată că granița dintre „mare" și „mic" e dată de numărul 1, în sensul următor. Dacă valoarea constantei de cuplaj a corzii este mai mică decât 1, atunci e din ce în ce mai *improbabil* să apară numere tot mai mari de perechi de corzi virtuale. Dacă valoarea constantei de cuplaj a corzii este 1 sau mai mare, e din ce în ce mai *probabil* să apară numere tot mai mari de asemenea perechi virtuale.[102] Concluzia este că, dacă constanta de cuplaj a corzii este mai mică decât 1, contribuțiile din diagrama buclelor devin din ce în ce mai mici odată cu creșterea numărului de bucle. Este exact condiția necesară metodei perturbațiilor, fiindcă astfel putem obține rezultate suficient de precise chiar dacă ignorăm toate procesele cu excepția celor care implică doar câteva bucle. Dar dacă valoarea constantei de cuplaj a corzii nu este mai mică dacât 1, contribuțiile diagramelor devin din ce în ce mai importante odată cu creșterea numărului de bucle. La fel ca în cazul unui sistem trinar de stele, abordarea perturbativă devine imposibilă. Presupusa primă estimare grosieră, procesul fără bucle, *nu* este corectă. (Această discuție e valabilă pentru oricare dintre cele cinci teorii ale corzilor, valoarea constantei de cuplaj a corzii din fiecare teorie determinând eficacitatea schemei perturbative.)

Ajungem astfel la următoarea întrebare crucială: care este valoarea constantei de cuplaj a corzii (sau, mai precis, care sunt valorile constantelor de cuplaj ale corzii în fiecare din cele cinci teorii)? *Deocamdată nimeni nu poate răspunde la această întrebare.* Este una dintre cele mai importante probleme ale teoriei corzilor care nu şi-a găsit încă rezolvarea. Concluziile bazate pe abordarea perturbativă sunt justificate numai dacă valoarea constantei de cuplaj a corzii este mai mică decât 1. Mai mult, valoarea exactă a constantei de cuplaj a corzii are o influenţă directă asupra maselor şi sarcinilor diferitelor moduri de vibraţie ale corzii. Vedem deci că o mare parte a fizicii depinde de valoarea constantei de cuplaj a corzii. De ce a rămas oare nerezolvată – în toate cele cinci teorii ale corzilor – problema atât de importantă a valorii ei?

Ecuaţiile teoriei corzilor

Abordarea perturbativă folosită pentru determinarea modului în care corzile interacţionează între ele poate fi folosită şi pentru a determina ecuaţiile fundamentale ale teoriei corzilor. În esenţă, ecuaţiile determină interacţiile şi, reciproc, interacţiile determină ecuaţiile.

Ca prim exemplu, în fiecare dintre cele cinci teorii ale corzilor există o ecuaţie menită să determine valoarea constantei de cuplaj a teoriei. Deocamdată însă, fizicienii au putut găsi doar o aproximaţie a acestei ecuaţii, în fiecare dintre cele cinci teorii, prin evaluarea matematică a unui număr mic de diagrame relevante ale corzilor, folosind abordarea perturbativă. Iată ce spun ecuaţiile aproximative: în toate cele cinci teorii, constanta de cuplaj a corzii ia o asemenea valoare încât, prin înmulţirea ei cu zero, rezultatul este zero. E o ecuaţie dezamăgitoare; înmulţirea cu zero a oricărui număr dă tot zero, prin urmare ecuaţia poate fi rezolvată pentru orice valoare a constantei de cuplaj a corzii. Astfel, în nici una din cele cinci teorii ale corzilor, ecuaţia aproximativă a constantei de cuplaj nu ne dă vreo informaţie despre valoarea ei.

În plus, în fiecare dintre cele cinci teorii există o altă ecuaţie care ar trebui să determine forma precisă pentru ambele tipuri de dimensiuni spaţio-temporale – extinse şi încolăcite. Versiunea aproximativă

a ecuației pe care o avem în momentul de față este mult mai restrictivă decât cea care determină valoarea constantei de cuplaj, dar și aceasta admite mai multe soluții. De exemplu, patru dimensiuni spațio-temporale extinse, împreună cu orice spațiu înfășurat Calabi-Yau hexadimensional, oferă o întreagă clasă de soluții, dar nici asta nu epuizează toate posibilitățile, fiindcă sunt cu putință diferite variante pentru numărul dimensiunilor extinse și cel al dimensiunilor încolăcite.[103]

Ce concluzii putem trage din aceste rezultate? Există trei posibilități. Să începem cu cea mai pesimistă dintre ele: deși fiecare teorie a corzilor are o ecuație pentru determinarea valorii constantei de cuplaj și o ecuație pentru obținerea numărului de dimensiuni și formei precise a spațiului-timp – ceea ce nici o altă teorie nu poate pretinde – s-ar putea ca forma exactă (încă necunoscută) a ecuațiilor să admită un spectru larg de soluții, iar astfel forța de predicție a teoriilor să fie subminată. Dacă este adevărat, acest lucru va constitui un pas înapoi pentru teoria corzilor fiindcă ea își propune să *explice* aceste caracteristici ale cosmosului, nu să ne ceară să le determinăm din observații experimentale și, într-un mod mai mult sau mai puțin arbitrar, să le introducem apoi în teorie. Vom reveni asupra acestei posibilități în capitolul 15. În al doilea rând, flexibilitatea nedorită a ecuațiilor aproximative ale corzilor ar putea indica o greșeală subtilă în raționamentele noastre. Încercăm să folosim o abordare perturbativă pentru a determina valoarea constantei de cuplaj a corzii. Dar, după cum am văzut, metodele perturbative sunt aplicabile doar dacă valoarea constantei de cuplaj este mai mică decât 1, deci calculele noastre se pot baza pe o presupunere neîntemeiată privind chiar rezultatul lor, și anume rezultatul este mai mic decât 1. Eșecul nostru ar putea indica faptul că am pornit de la o premisă falsă și că, în toate cele cinci teorii, constanta de cuplaj este mai mare decât 1. În al treilea rând, flexibilitatea nedorită s-ar putea datora doar faptului că folosim ecuații aproximative, și nu ecuații exacte. De pildă, chiar dacă valoarea constantei de cuplaj într-o anumită teorie a corzilor poate fi mai mică decât 1, ecuațiile teoriei ar putea depinde în continuare de contribuțiile *tuturor* diagramelor. Adică, însumarea micilor rafinări provenind de la diagramele cu tot mai multe bucle ar putea fi esențială pentru transformarea ecuațiilor aproximative (care admit multe soluții) în ecuațiile exacte care sunt mai restrictive.

La începutul anilor 1990, ultimele două posibilități i-au făcut pe teoreticienii corzilor să înțeleagă că metodele perturbative împiedicau

progresul. Aproape toți fizicienii erau de acord că următoarea abordare trebuia să fie *neperturbativă* – să nu se întemeieze pe aproximații și să depășească limitările cadrului perturbativ. În 1994, găsirea unei asemenea căi părea un vis. Uneori însă visele devin realitate.

Dualitate

Sute de teoreticieni ai corzilor din lumea întreagă se întâlnesc anual la o conferință care trece în revistă rezultatele din anul precedent și analizează diferitele direcții de cercetare. În funcție de progresul înregistrat în acel an se poate prevedea interesul participanților. Pe la mijlocul anilor 1980, în zorii primei revoluții a corzilor, întâlnirile erau pline de euforie. Speranța generală a fizicienilor era că în scurt timp vor înțelege pe deplin teoria corzilor și o vor putea prezenta ca pe teoria ultimă a universului. Privind retrospectiv, era o naivitate. Anii care au trecut au arătat că există o mulțime de aspecte profunde și subtile ale teoriei corzilor care vor necesita fără îndoială un efort prelungit și continuu pentru a fi înțelese. Speranțele premature, total nerealiste, au avut consecințe nedorite, mulți fiind dezamăgiți că lucrurile nu s-au lămurit imediat. Astfel, conferințele de la sfârșitul anilor 1980 reflectau deziluzia – fizicienii prezentau rezultate interesante, dar atmosfera nu era însuflețită. Unii au propus chiar să nu se mai țină anual conferințe despre corzi. La începutul anilor 1990 însă, situația s-a schimbat. Teoria corzilor a început să fie reconstruită, iar cercetătorii și-au redobândit entuziasmul și optimismul grație numeroaselor descoperiri, dintre care multe au fost deja prezentate în capitolele anterioare. Dar nimic nu prevestea ce avea să se întâmple la conferința din martie 1995, ținută la Universitatea din Carolina de Sud.

Când a sosit momentul intervenției sale, Edward Witten s-a îndreptat spre podium și a ținut o prelegere care a declanșat cea de-a doua revoluție a teoriei corzilor. Inspirat de lucrările anterioare ale lui Duff, Hull, Townsend și bazându-se pe ideile lui Schwarz, ale fizicianului indian Asoke Sen și ale altora, Witten a anunțat descoperirea unei strategii care să depășească înțelegerea perturbativă a teoriei corzilor. În centrul planului său se află noțiunea de *dualitate*.

Fizicienii folosesc termenul de dualitate pentru modele teoretice care par diferite, însă se dovedește că descriu exact aceeași fizică.

Există exemple „banale“ de dualitate în care teorii identice par diferite doar din cauza felului în care sunt prezentate. Pentru cineva care ştie doar engleză, teoria generală a relativităţii nu va fi imediat recunoscută ca aparţinând lui Einstein dacă e prezentată în limba chineză. Însă un fizician care cunoaşte bine ambele limbi poate face imediat o traducere care stabileşte echivalenţa celor două. Numim acest exemplu banal pentru că, din punctul de vedere al fizicii, nu se câştigă nimic printr-o asemenea traducere. Dacă un bun cunoscător al ambelor limbi ar studia o problemă dificilă din teoria generală a relativităţii, soluţia ar fi la fel de complicată indiferent de limba în care e exprimată. Trecerea de la engleză la chineză nu aduce nici o idee nouă în fizică.

Exemplele nebanale de dualitate sunt acelea în care descrieri diferite ale aceleiaşi situaţii fizice conduc *într-adevăr* la idei fizice şi metode matematice de analiză diferite şi complementare. De fapt, am întâlnit deja două exemple de dualitate. În capitolul 10 am văzut că, într-un univers cu o dimensiune circulară de rază R, teoria corzilor poate la fel de bine corespunde şi unui univers cu dimensiunea circulară de rază $1/R$. Acestea constituie situaţii geometrice distincte care, datorită proprietăţilor teoriei corzilor, sunt de fapt fizic identice. În acest caz, două forme diferite Calabi-Yau ale celor şase dimensiuni spaţiale suplimentare – universuri care la prima vedere ar părea complet diferite – conduc la aceeaşi fizică. Ele oferă descrieri complementare ale aceluiaşi univers. Spre deosebire de cazul englezei şi chinezei, folosirea acestor descrieri duale are importante consecinţe fizice, de pildă mărimea minimă a dimensiunii circulare şi procesele în care se schimbă topologia din teoria corzilor.

În intervenţia sa de la conferinţa Strings ’95, Witten a prezentat dovezi în favoarea existenţei unei noi şi profunde dualităţi. După cum am văzut la începutul acestui capitol, el a sugerat că cele cinci teorii, deşi aparent diferite în construcţia lor, sunt doar moduri diferite de a descrie aceeaşi fizică. În loc să avem cinci teorii diferite ale corzilor, am avea doar cinci ferestre diferite deschise către un unic cadru teoretic.

Înaintea descoperirilor de la mijlocul anilor 1990, posibilitatea unei asemenea versiuni a dualităţii era doar o dorinţă pe care mulţi o aveau, dar despre care nici nu îndrăzneau să vorbească. Dacă două teorii ale corzilor diferă în privinţa detaliilor semnificative ale construcţiei lor, este greu de imaginat că ele ar fi doar descrieri diferite ale aceleiaşi fizici. Totuşi, graţie puterii subtile a teoriei corzilor, există din ce în

ce mai multe dovezi că toate cele cinci teorii sunt *duale*. În plus, după cum vom vedea, Witten ne oferă dovezi că ar exista și o a șasea teorie în aceeași situație ca primele cinci.

Aceste descoperiri sunt intim legate de problemele privind aplicabilitatea metodelor perturbative întâlnite la sfârșitul secțiunii precedente: cele cinci teorii sunt evident diferite atunci când fiecare dintre ele e *slab cuplată* (constanta de cuplaj a teoriei este mai mică de 1). Datorită faptului că se bazau pe metode perturbative, fizicienii nu au fost în stare să-și pună întrebarea ce proprietăți ar avea oricare dintre cele cinci teorii dacă constanta de cuplaj ar fi mai mare decât 1 – *cuplaj tare*. Witten și alți fizicieni susțin că aceasta e întrebarea crucială la care trebuie să răspundem. Rezultatele lor sugerează în mod convingător că, împreună cu a șasea teorie pe care o vom prezenta curând, cuplajul tare al oricăreia din aceste teorii are o descriere duală în termenii cuplajului slab al alteia și viceversa.

Iată o analogie ilustrativă. Să ne închipuim doi indivizi oarecum unilaterali. Unul adoră gheața, dar, ciudat lucru, n-a văzut niciodată apa în forma ei lichidă. Celălalt adoră apa, dar, la fel de ciudat, n-a văzut niciodată gheață. Întâlnindu-se din întâmplare, hotărăsc să facă împreună o excursie în deșert. Când sunt pe punctul de a pleca, fiecare dintre ei este fascinat de obiectele celuilalt. Amatorul de gheață este captivat de lichidul mătăsos și transparent al amatorului de apă, iar amatorul de apă este atras de remarcabilele cuburi de cristal solid aduse de amatorul de gheață. Nici unul nu are vreun indiciu că există de fapt o relație profundă între apă și gheață; pentru ei sunt două substanțe complet diferite. Dar, când ajung în căldura înăbușitoare a deșertului, sunt șocați să descopere că gheața se transformă încet în apă. Și sunt la fel de șocați să vadă cum, în timpul nopților friguroase din deșert, apa lichidă începe să se transforme ușor în gheață. Ei își dau seama că aceste două substanțe, pe care inițial le credeau distincte, sunt intim legate.

Dualitatea care leagă cele cinci teorii ale corzilor este oarecum similară: în linii mari, constantele de cuplaj joacă același rol ca temperatura din deșert. La fel ca gheața și apa, oricare două dintre cele cinci teorii ale corzilor par complet diferite la prima vedere. Dar, dacă modificăm constantele lor de cuplaj, teoriile suferă o transmutație. La fel cum gheața se transformă în apă când creștem temperatura, o teorie se poate transforma într-alta odată cu creșterea valorii constantei

de cuplaj. Astfel, facem un pas înainte în demonstrarea faptului că teoriile corzilor sunt descrieri duale ale unei structuri fundamentale unice, analogul lui H_2O pentru apă și gheață.

Raționamentul care stă la baza acestor rezultate se sprijină în mare parte pe argumente ce țin de principiile simetriei. E momentul să vorbim despre acest subiect.

Puterea simetriei

Ani de-a rândul, nimeni n-a încercat să studieze proprietățile celor cinci teorii în cazul în care valoarea constantei de cuplaj este mai mare decât 1 din simplul motiv că nimeni nu știa cum trebuie procedat în absența metodei perturbative. Pe la sfârșitul anilor 1980 și începutul anilor 1990, fizicienii au făcut totuși progrese lente, dar constante în identificarea anumitor proprietăți – între care valorile unor mase și sarcini de forță – care, deși țin de fizica cuplajului tare pentru o teorie dată, pot fi calculate. Determinarea acestor proprietăți, care depășește cadrul perturbativ, a jucat un rol esențial în declanșarea celei de-a doua revoluții a supercorzilor și se bazează pe forța simetriei.

Principiile simetriei constituie unelte de analiză care ne ajută să înțelegem multe fenomene ale lumii fizice. Am văzut, de pildă, că ideea conform căreia legile fizicii nu tratează preferențial nici un loc din univers și nici un moment de timp ne îndreptățește să afirmăm că legile care guvernează „aici și acum" sunt aceleași oriunde și oricând. Este un exemplu foarte general, dar principiile simetriei pot fi la fel de importante și în alte împrejurări. De exemplu, dacă ești martor la o crimă și vezi doar partea dreaptă a feței criminalului, un desenator poate reconstitui pe baza informației tale întreaga față, iar aceasta grație simetriei. Deși există diferențe între părțile stângă și dreaptă ale chipului, cei mai mulți oameni sunt suficient de simetrici pentru ca imaginea unei părți să poată fi oglindită pentru a obține o aproximație bună a celeilalte.

În acest spectru larg de aplicații se vede că puterea simetriei are capacitatea de a identifica proprietăți într-o manieră *indirectă*, lucru deseori mai simplu decât abordarea directă. Am putea cunoaște fizica fundamentală a galaxiei Andromeda mergând acolo, găsind o planetă

în jurul unei stele și construind acolo un accelerator cu care să efectuăm acele experimente pe care le facem pe Pământ. Dar abordarea indirectă prin invocarea simetriei la schimbarea poziției este mult mai simplă. Putem afla trăsăturile părții stângi a feței criminalului prinzându-l și examinându-l. Dar adesea este mai ușor să folosim simetria stânga-dreapta a fețelor.[104]

Supersimetria e un principiu de simetrie mai abstract care se leagă de proprietățile fizice ale constituenților elementari având spini diferiți. Experimentele oferă doar indicii că lumea microscopică încorporează această simetrie, dar, din motive pe care le-am prezentat deja, există convingerea fermă că așa stau lucrurile – iar teoria corzilor include supersimetria. În anii 1990, ghidați de cercetările lui Nathan Seiberg de la Institutul pentru Studii Avansate, fizicienii și-au dat seama că supersimetria oferă un instrument eficace cu care se poate găsi răspunsul la multe întrebări dificile și importante prin metode indirecte.

Chiar și fără înțelegerea detaliilor intime ale unei teorii, faptul că supersimetria este inclusă în ea ne permite deja să impunem condiții restrictive asupra proprietăților pe care le poate avea. Recurgând la o analogie lingvistică, să ne imaginăm că ni se spune că pe o foaie de hârtie a fost scris un șir de litere, în șir apare exact de trei ori litera „y“, iar hârtia a fost pusă într-un plic sigilat. Dacă nu ni se mai dă o informație suplimentară, nu avem nici o șansă să ghicim șirul de litere. Poate conține o combinație aleatoare de litere conținând cei trei „y“, de exemplu, *cvkjerybkjkyybmk*, sau oricare alta dintr-o infinitate de posibilități. Dar să ne închipuim că ni se mai dau două indicii: șirul secret de litere reprezintă un cuvânt în limba engleză și are numărul minim de litere în acord cu primul indiciu care ne spune că „y“ apare de trei ori. Din infinitatea de combinații de litere de la început, aceste indicii reduc posibilitățile la un *singur* cuvânt, cel mai scurt cuvânt englezesc care conține de trei ori litera „y“: *syzygy*.

Supersimetria oferă restricții similare pentru acele teorii care includ principiile ei de simetrie. Pentru a înțelege mai bine acest lucru, să ne imaginăm că ni se dă o problemă de fizică asemănătoare celei lingvistice prezentate anterior. Într-o cutie este ascuns ceva – identitatea acestui ceva nu e precizată – care are o anumită sarcină de forță. Sarcina poate fi electrică, magnetică sau orice altă generalizare, dar, pentru ca exemplul să fie concret, să spunem că e vorba de trei unități de sarcină electrică. Fără alte informații, identitatea conținutului nu poate

fi determinată. Ar putea fi trei particule cu sarcina 1, ca pozitronii sau protonii; ar putea fi patru particule de sarcină 1 şi o particulă de sarcină –1 (ca electronul), pentru că valoarea netă a acestei combinaţii este tot 3; ar putea fi nouă particule cu sarcini 1/3 (asemenea cuarcului up) sau ar putea fi aceleaşi nouă particule însoţite de oricâte particule fără sarcină (cum ar fi fotonii). Ca şi în cazul combinaţiei secrete de litere, când ştiam doar despre cei trei „y", există o infinitate de posibilităţi pentru conţinutul cutiei.

Dar să ne imaginăm acum, la fel ca în cazul problemei lingvistice, că ni se mai dau două indicii: teoria care descrie lumea – deci şi conţinutul cutiei – este supersimetrică, iar conţinutul cutiei are *masa minimă* în acord cu prima condiţie de a avea 3 unităţi de sarcină. Bazându-se pe ideile lui E. Bogomol'nyi, Manoj Prasad şi Charles Sommerfield, fizicienii au demonstrat că această stabilire a cadrului (cadrul supersimetriei fiind analogul limbii engleze din exemplul precedent) şi o „condiţie de minimum" (masă minimă pentru o cantitate dată de sarcină electrică, analogul condiţiei de lungime minimă a unui cuvânt pentru un număr dat de ocurenţe ale literei „y") determină identitatea conţinutului secret în mod *unic*. Cu alte cuvinte, fizicienii au arătat că simpla impunere a condiţiei de masă minimă pentru o sarcină dată identifică fără dubii conţinutul cutiei. Constituenţii de masă minimă pentru o valoare dată a sarcinii poartă numele de *stări BPS* în onoarea celor trei descoperitori.[105]

Stările BPS sunt importante pentru că proprietăţile lor sunt determinate în mod unic, simplu şi exact, fără a face apel la calcule perturbative. Afirmaţia rămâne valabilă indiferent de valoarea constantelor de cuplaj. Cu alte cuvinte, chiar dacă constanta de cuplaj e mare, şi deci abordarea perturbativă e imposibilă, putem deduce proprietăţile exacte ale configuraţiilor BPS. Proprietăţile sunt adesea numite mase şi sarcini *neperturbative* pentru că valorile lor depăşesc schema aproximaţiilor perturbative. Din acest motiv ne putem gândi că BPS vine şi de la „*beyond perturbative states*" („stări dincolo de cadrul perturbativ").

Proprietăţile BPS reprezintă doar o mică parte din totalitatea proprietăţilor fizice ale unei anume teorii a corzilor atunci când constanta sa de cuplaj este mare, dar ne oferă totuşi informaţii asupra caracteristicilor cuplajului tare. Când constanta de cuplaj a unei anume teorii a corzilor creşte dincolo de domeniul de aplicabilitate al teoriei per-

turbative, ne limităm la stările BPS. Asemeni câtorva cuvinte bine alese într-o limbă străină, ne vor ajuta să avansăm destul de mult.

Dualitatea în teoria corzilor

Mergând pe urmele lui Witten, să începem cu una din cele cinci teorii ale corzilor, de pildă, Tipul I, și să ne închipuim că toate cele nouă dimensiuni spațiale sunt plate și neîncolăcite. Evident, e total nerealist, dar simplifică discuția; ne vom întoarce imediat la dimensiunile încolăcite. Să începem prin a presupune că constanta de cuplaj este mult mai mică decât 1. În acest caz, metodele perturbative sunt valabile, deci multe dintre proprietățile detaliate ale teoriei pot fi (și au fost) determinate cu precizie. Dacă creștem valoarea constantei de cuplaj, dar o menținem sub 1, putem folosi în continuare metodele perturbative. Detalii ale proprietăților teoriei se vor modifica oarecum – de exemplu, valorile numerice asociate cu împrăștierea unei corzi pe o altă coardă vor fi puțin diferite, pentru că procesele cu mai multe bucle din figura 12.6 dau contribuții mai mari atunci când valoarea constantei de cuplaj crește. Dincolo de aceste schimbări ale proprietăților numerice detaliate, conținutul fizic general al teoriei rămâne același atât timp cât constanta de cuplaj rămâne în domeniul perturbativ.

Când creștem constanta de cuplaj a Tipului I de coardă peste valoarea 1, metodele perturbative devin inaplicabile și trebuie să ne concentrăm doar asupra setului limitat de mase și sarcini neperturbative – stările BPS – pe care le putem înțelege în continuare. Iată ce a afirmat Witten, și a confirmat apoi într-un articol publicat împreună cu Joe Polchinski de la Universitatea din California: *Caracteristicile de cuplaj tare ale Tipului I de teorie a corzilor corespund perfect proprietăților cunoscute ale teoriei Heterotice-O a corzilor, când aceasta din urmă are o valoare mică pentru constanta ei de cuplaj.* Adică, atunci când constanta de cuplaj a Tipului I de coardă este mare, valorile precise ale maselor și sarcinilor pe care știm cum să le obținem sunt riguros egale cu cele ale teoriei Heterotice-O a corzilor când valoarea constantei ei de cuplaj este mică. Aceasta ne oferă un indiciu concludent că cele două teorii ale corzilor care la prima vedere par total diferite, ca apa și gheața, sunt de fapt duale. Ni se sugerează că proprietățile fizice ale Tipului I de coardă pentru valori mari ale constantei de cuplaj

sunt identice cu proprietățile fizice ale teoriei Heterotice-O a corzilor pentru valori mici ale constantei de cuplaj. Argumente asemănătoare arată că și reciproca e valabilă: proprietățile fizice ale Tipului I de coardă pentru valori mici ale constantei de cuplaj *sunt identice* cu proprietățile fizice ale teoriei Heterotice-O a corzilor pentru valori mari ale constantei de cuplaj.[106] Deși din perspectiva aproximației perturbative între cele două teorii nu pare să existe vreo legătură, vedem acum că ele se transformă una într-alta – oarecum asemănător tranziției de la apă la gheață – la modificarea valorii constantelor de cuplaj.

Acest nou tip de rezultat – fizica cuplajului tare pentru o teorie este descrisă de fizica cuplajului slab pentru altă teorie – se numește *dualitate tare-slabă.* La fel ca în cazul celorlalte dualități prezentate anterior, se poate vedea că cele două teorii nu sunt de fapt distincte. Ele dau două descrieri diferite ale aceleiași teorii fundamentale. Spre deosebire de dualitatea banală dintre engleză și chineză, dualitatea de cuplaj tare-slab este semnificativă. Când constanta de cuplaj a unui membru al perechii de teorii duale este mică, putem analiza proprietățile fizice folosind metodele perturbative bine puse la punct. Când constanta de cuplaj este mare, deci metodele perturbative nu mai sunt valabile, știm acum că putem folosi descrierea duală – în care constanta de cuplaj relevantă este mică – și ne putem astfel întoarce la metodele perturbative. Aceste permutări au avut ca rezultat obținerea metodelor cantitative de analiză a unei teorii pe care o consideraserăm inițial dincolo de posibilitățile noastre teoretice.

În realitate, demonstrarea faptului că fizica cuplajului tare al corzilor de Tipul I este identică cu fizica cuplajului slab al corzilor Heterotice-O, și invers, este o sarcină extrem de dificilă care nu a fost încă dusă la bun sfârșit. Motivul e simplu. Unul din membrii persupusei perechi de teorii duale nu poate fi verificat prin analiza perturbativă deoarece constanta sa de cuplaj este prea mare, ceea ce îngreunează calculul direct al multora dintre proprietățile sale fizice. De fapt, tocmai în asta constă forța dualității: dacă este adevărată, va furniza noi metode de a analiza o teorie cu un cuplaj tare – tehnicile perturbative aplicate descrierii ei duale cu un cuplaj slab.

Dar chiar dacă nu putem demonstra că cele două teorii sunt duale, alinierea perfectă a acelor proprietăți pe care le *putem* extrage oferă dovezi convingătoare privind relația dintre cele două teorii. Calcule

tot mai sofisticate au confirmat existenţa dualităţii. Majoritatea fizicienilor sunt convinşi că dualitatea este reală.

Urmând aceeaşi metodă, putem studia proprietăţile de cuplaj tare ale altei teorii a corzilor, de exemplu Tipul IIB. Ipoteza lansată de Hull și Townsend a fost confirmată de mai mulți fizicieni: şi aici se petrece un fenomen remarcabil. Odată cu creşterea constantei de cuplaj a Tipului IIB, proprietățile fizice pe care le putem încă înțelege par să se potrivească exact cu cuplajul slab al aceleiaşi teorii, Tipul IIB. Cu alte cuvinte Tipul IIB este *autodual.*[107] Analizele detaliate sugerează că dacă constanta de cuplaj a Tipului IIB e mai mare decât 1 şi dacă îi înlocuim valoarea cu inversul ei (deci o constantă de cuplaj mai mică decât 1), teoria rezultantă ar fi absolut identică cu cea de la care am pornit. La fel ca atunci când am încercat să restrângem o dimensiune circulară la o lungime sub scara Planck, dacă încercăm să mărim constanta de cuplaj a Tipului IIB la o valoare mai mare ca 1, autodualitatea ne arată că teoria rezultată este exact echivalentă cu Tipul IIB pentru o constantă de cuplaj mai mică decât 1.

Un rezumat parțial

Pe la mijlocul anilor '80, fizicienii au construit cinci teorii diferite ale supercorzilor. În aproximaţia perturbativă, toate teoriile par distincte. Dar această metodă de aproximare este valabilă doar dacă constanta de cuplaj a corzii dintr-o teorie dată este mai mică decât 1. S-a crezut că fizicienii vor putea calcula valoarea precisă a constantei de cuplaj în fiecare dintre teorii, însă forma actuală e ecuațiilor aproximative face acest lucru imposibil. De aceea s-a încercat studiul fiecăreia dintre cele cinci teorii pentru un spectru larg de valori posibile ale constantei de cuplaj, atât mai mari, cât și mai mici decât 1 – adică, și pentru cuplaj slab, şi pentru cuplaj tare. Metodele perturbative tradiționale nu oferă vreo indicație despre caracteristicile cuplajului tare în nici una dintre teorii.

De curând, cu ajutorul supersimetriei, fizicienii au învățat să calculeze unele dintre proprietățile cuplajului tare pentru o teorie dată. Şi, spre surpriza tuturor celor care lucrează în domeniu, proprietățile cuplajului tare al Heteroticului-O par să fie identice cu proprietăţile

cuplajului slab al Tipului-I, şi invers. În plus, proprietăţile fizice ale cuplajului tare al Tipului IIB sunt identice cu proprietăţile aceluiaşi tip de corzi pentru un cuplaj slab. Aceste legături neaşteptate ne încurajează să-l urmăm pe Witten şi să cercetăm celelalte două teorii, Tipul IIA şi Heteroticul-E, pentru a vedea cum se potrivesc în imaginea de ansamblu. Aici vom avea parte de surprize şi mai exotice. Pentru a fi pregătiţi, avem nevoie de o scurtă digresiune istorică.

Supergravitaţia

Pe la sfârşitul anilor '70 şi începutul anilor '80, înainte să se trezească interesul pentru teoria corzilor, mulţi fizicieni erau în căutarea unei teorii care să unifice mecanica cuantică, gravitaţia şi celelalte forţe în cadrul teoriei cuantice de câmp a particulelor punctiforme. Existau speranţe ca nepotrivirile dintre gravitaţie şi mecanica cuantică să fie depăşite prin studiul teoriilor care includeau numeroase simetrii. În 1976, Stanley Deser şi Bruno Zumino, de la CERN, şi, independent, Daniel Freedman, Sergio Ferrara şi Peter Van Nieuwenhuizen, pe atunci toţi de la Universitatea de Stat din New York, au descoperit că cele mai promiţătoare erau teoriile care implicau supersimetria, datorită tendinţei bosonilor şi fermionilor de a avea fluctuaţii cuantice care să se anuleze reciproc, iar astfel să se liniştească violenta agitaţie microscopică. Autorii au folosit termenul de *supergravitaţie* pentru teoriile de câmp cuantice supersimetrice care încearcă să încorporeze teoria generală a relativităţii. Tentativele de a împleti teoria generală a relativităţii cu mecanica cuantică au eşuat în cele din urmă. Totuşi, aşa cum am menţionat în capitolul 8, din aceste cercetări s-a putut trage o concluzie ce avea să prevestească apariţia teoriei corzilor.

Concluzia, care devenea din ce în ce mai limpede graţie lucrărilor lui Eugène Cremmer, Bernard Julia şi Scherk, toţi la Şcoala Normală Superioară în 1978, era aceea că tentativele cele mai aproape de succes erau teoriile supergravitaţiei formulate nu în patru dimensiuni, ci în mai multe. Mai precis, cele mai promiţătoare erau versiunile care necesitau zece sau unsprezece dimensiuni. S-a dovedit că unsprezece este numărul maxim de dimensiuni.[108] Legătura cu cele patru dimensiuni observabile se făcea, din nou, în cadrul creat de Kaluza şi Klein: dimen-

siunile suplimentare erau încolăcite. În teoriile cu zece dimensiuni, la fel ca în teoria corzilor, şase dimensiuni erau încolăcite, în timp ce pentru teoriile cu unsprezece dimensiuni, şapte erau încolăcite.

Când teoria corzilor a bulversat fizica în 1984, teoriile supergravitaţiei cu particule punctiforme au apărut în altă lumină. Aşa cum am subliniat în repetate rânduri, dacă examinăm o coardă cu precizia disponibilă actualmente sau într-un viitor previzibil, ea *arată* ca o particulă punctiformă. Putem reformula mai precis: când studiem procesele de energie joasă din teoria corzilor – acele procese care nu au suficientă energie pentru a sonda natura ultramicroscopică, extinsă a corzii – putem aproxima coarda cu o particulă punctiformă fără structură, folosindu-ne de cadrul teoriei cuantice de câmp a particulelor punctiforme. Nu putem folosi această aproximaţie în cazul proceselor la distanţe scurte sau energii înalte pentru că ştim că natura extinsă a corzii este cea care ne dă posibilitatea să depăşim contradicţia dintre teoria generală a relativităţii şi mecanica cuantică, ceea ce nu e cu putinţă în teoria particulelor punctiforme. Dar la energii suficient de joase şi distanţe suficient de mari nu întâlnim asemenea probleme, iar această aproximaţie e deseori folosită pentru simplificarea calculelor.

Teoria cuantică de câmp care aproximează cel mai bine teoria corzilor nu este alta decât supergravitaţia cu zece dimensiuni. Proprietăţile supergravitaţiei cu zece dimensiuni, descoperite în anii '70 şi '80, sunt privite acum ca vestigii la energie joasă ale teoriei corzilor. Cercetătorii care au studiat supergravitaţia cu zece dimensiuni au descoperit vârful unui iceberg – structura extrem de bogată a teoriei supercorzilor. De fapt, există patru teorii ale supergravitaţiei cu zece dimensiuni, care diferă la nivelul detaliilor de încorporare a supersimetriei. Trei dintre ele sunt aproximaţiile de particule punctiforme la energie joasă ale teoriilor de Tipul IIA, IIB şi Heterotic-E. Al patrulea tip este o aproximaţie de particule punctiforme la energie joasă ale Tipului I şi Heteroticului-O. Privind retrospectiv, acesta a constituit primul indiciu al strânsei legături între cele două teorii ale corzilor.

Toate bune şi frumoase, numai că supergravitaţia cu unsprezece dimensiuni a rămas pe dinafară. Teoria corzilor, formulată în zece dimensiuni, pare a nu mai lăsa loc pentru o altă teorie cu unsprezece dimensiuni. Timp de mai mulţi ani, majoritatea fizicienilor au privit supergravitaţia cu unsprezece dimensiuni ca pe o ciudăţenie matematică fără legătură cu fizica teoriei corzilor.[109]

Semne ale teoriei M

Acum perspectiva s-a schimbat. La conferinţa Strings '95, Witten a afirmat că, dacă pornim de la coarda Tip IIA şi îi creştem constanta de cuplaj de la o valoare mult mai mică decât 1 la o valoare mult mai mare decât 1, fizica pe care o mai putem încă analiza (în esenţă cea a configuraţiilor saturate BPS) este, în aproximaţia energiilor joase, chiar supergravitaţia cu unsprezece dimensiuni.

Când Witten a anunţat această descoperire, participanţii la conferinţă au fost uimiţi. Pentru aproape toţi cei din domeniu a fost un neaşteptat pas înainte. Prima întrebare care ne vine în minte e cea pe care şi-au pus-o atunci şi fizicienii: *cum poate fi relevantă o teorie care este specifică numărului de unsprezece dimensiuni pentru o teorie diferită, care are zece dimensiuni*?

Răspunsul are semnificaţii profunde. Pentru a-l înţelege, va trebui să prezentăm mai detaliat rezultatul lui Witten. De fapt, este mai uşor să ilustrăm întâi un alt rezultat legat de acesta – descoperit ulterior de Witten şi Petr Hořava – care se referă la coarda Heterotică-E. Ei au descoperit că aceasta, cuplată tare, are şi ea o descriere în unsprezece dimensiuni, iar figura 12.7 ne arată de ce. În stânga figurii, constanta de cuplaj a corzii Heterotice-E este considerată mult mai mică decât 1. Acesta este domeniul prezentat în capitolele precedente şi pe care teoreticienii corzilor îl studiază de peste zece ani. Deplasându-ne spre dreapta în figura 12.7, creştem treptat valoarea constantei de cuplaj. Înainte de 1995, teoreticienii corzilor ştiau deja că acest lucru va face ca procesele cu bucle (vezi figura 12.6) să devină din ce în ce mai importante şi, când constanta de cuplaj creşte şi mai mult, întreg cadrul perturbativ e invalidat. Dar ceea ce nimeni nu bănuia era faptul că, odată cu creşterea constantei de cuplaj, o nouă dimensi-

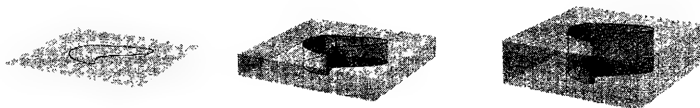


Figura 12.7 Odată cu creşterea constantei de cuplaj a corzii Heterotice-E, apare o nouă dimensiune spaţială, iar coarda însăşi este întinsă sub forma unei membrane cilindrice.

une devine vizibilă! Aceasta este dimensiunea „verticală“ prezentată în figura 12.7. Să ne aducem aminte că în această figură rețeaua bidimensională de la care pornim reprezintă toate cele nouă dimensiuni spațiale ale corzii Heterotice-E. Astfel, noua dimensiune verticală reprezintă *a zecea* dimensiune spațială, care, împreună cu timpul, face ca numărul total al dimensiunilor spațio-temporale să fie unsprezece.

În plus, figura 12.7 ilustrează o consecință profundă a acestei noi dimensiuni. *Structura* corzii Heterotic-E se schimbă odată cu creșterea acestei dimensiuni. Este întinsă de la o buclă unidimensională la o bandă și apoi la un cilindru deformat când crește constanta de cuplaj. Cu alte cuvinte, coarda Heterotic-E este de fapt *o membrană bidimensională* a cărei lățime (lungimea verticală din figura 12.7) este controlată de valoarea constantei de cuplaj. Timp de un deceniu, teoreticienii corzilor au folosit metodele perturbative bazate pe presupunerea că valoarea constantei de cuplaj este foarte mică. După cum afirma Witten, această presupunere a făcut ca ingredientele fundamentale să arate și să se comporte ca niște corzi unidimensionale, deși ele aveau de fapt o a doua dimensiune spațială ascunsă. Eliminând presupunerea că valoarea constantei de cuplaj este foarte mică și considerând proprietățile fizice ale corzii Heterotice-E atunci când constanta de cuplaj este mare, cea de-a doua dimensiune devine evidentă.

Această descoperire nu invalidează nici una din concluziile capitolelor precedente, dar ne obligă să le privim dintr-o nouă perspectivă. De exemplu, cum se potrivesc toate acestea cu cele nouă dimensiuni spațiale și una temporală cerute de teoria corzilor? Să ne amintim din capitolul 8 că această constrângere a apărut din luarea în calcul a direcțiilor independente în care poate vibra o coardă și din impunerea condiției ca numărul lor să garanteze faptul că probabilitățile cuantice au valori rezonabile. Noua dimensiune pe care tocmai am descoperit-o *nu este* o dimensiune în care coarda Heterotică-E poate vibra, fiindcă e „închisă“ în însăși structura corzilor. Astfel spus, cadrul perturbativ pe care fizicienii îl foloseau pentru a deduce că există zece dimensiuni spațio-temporale presupunea din start o constantă de cuplaj a corzii Heterotice-E mică. Se ajungea astfel la două aproximații între care exista un acord perfect: lățimea membranei din figura 12.7 este mică, făcând-o să arate ca o coardă, și a unsprezecea dimensiune este atât de mică, încât ecuațiile perturbative n-o puteau pune în evidență. În cadrul acestei scheme de aproximare, suntem conduși către un univers

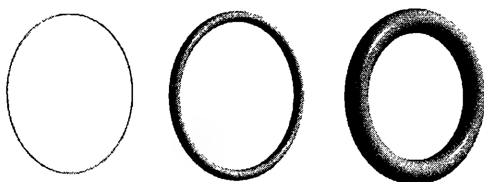


Figura 12.8 Când constanta de cuplaj a corzii Tipului IIA crește, corzile se transformă dintr-o buclă unidimensională într-un obiect bidimensional care seamănă cu o cameră de bicicletă.

cu zece dimensiuni populat cu corzi unidimensionale. Acum ne dăm seama că nu era decât o aproximație pentru universul cu unsprezece dimensiuni care conține membrane bidimensionale.

Din motive tehnice, Witten a descoperit cea de-a unsprezecea dimensiune studiind proprietățile la cuplaj tare ale corzii de Tip IIA, iar acolo lucrurile se petrec asemănător. La fel ca în exemplul corzii Heterotice-E, există o a unsprezecea dimensiune a cărei mărime este determinată de constanta de cuplaj a Tipului IIA. Când valoarea ei crește, noua dimensiune crește. Witten a arătat că, odată cu creșterea, coarda de tip IIA, în loc să se întindă formând o bandă ca în cazul corzii Heterotice-E, se transformă într-o cameră de bicicletă, așa cum se vede în figura 12.8. Din nou, Witten a arătat că, deși teoreticienii considerau mereu corzile de Tip IIA ca obiecte unidimensionale, având numai lungime, nu și grosime, aceasta nu reflectă decât folosirea aproximației perturbative, în care constanta de cuplaj a corzii este presupusă a fi mică. Dacă natura cere ca într-adevăr constanta de cuplaj să fie mică, atunci aproximația e demnă de încredere. Argumentele lui Witten și ale altor fizicieni din perioada celei de-a doua revoluții a corzilor oferă însă dovezi convingătoare că de fapt corzile de Tipul IIA și Heterotic-E sunt, în mod fundamental, membrane bidimensionale dintr-un univers cu unsprezece dimensiuni.

Dar ce *este* de fapt această teorie cu unsprezece dimensiuni? Witten și alții au afirmat că la energii joase (joase în comparație cu energia Planck) ea este aproximată de îndelung ignorata teorie cuantică de câmp a supergravitației cu unsprezece dimensiuni. Dar cum putem descrie această teorie la energii înalte? Problema e în prezent intens dezbătută. Știm din figurile 12.7 și 12.8 că teoria cu unsprezece dimensiuni

conține obiecte bidimensionale extinse – membranele bidimensionale. Și așa cum vom vedea în curând, obiectele extinse de alte dimensiuni joacă și ele un rol important. Dar, dincolo de amalgamul de proprietăți, *nimeni nu știe ce este de fapt această teorie cu unsprezece dimensiuni.* Oare membranele sunt ingredientele ei fundamentale? Care sunt proprietățile care o definesc? Cum se leagă de fizica pe care o cunoaștem? Dacă valorile constantelor de cuplaj sunt mici, în momentul de față cele mai bune răspunsuri la aceste întrebări sunt prezentate în capitolele anterioare, pentru că, la valori mici ale constantei de cuplaj, ne putem întoarce la teoria corzilor. Dar dacă valorile constantelor de cuplaj nu sunt mici, nimeni nu cunoaște deocamdată răspunsurile. Orice ar fi teoria cu unsprezece dimensiuni, Witten a botezat-o provizoriu teoria M. Numele acesta poate avea mai multe semnificații. Câteva exemple: Teoria Misterioasă, Mama Teoriilor (adică „Mama tuturor teoriilor"), Teoria Membranelor (căci, indiferent ce este, membranele par să facă parte din ea), Teoria Matricelor (conform unor articole recente ale lui Tom Banks de la Universitatea Rutgers, Willy Fischler de la Universitatea din Texas, Austin, Stephen Shenker de la Universitatea Rutgers și Susskind, care oferă o nouă interpretare a teoriei). Dar chiar dacă nu-i înțelegem bine numele și proprietățile, e deja limpede că teoria M oferă o bază unificatoare pentru toate cele cinci teorii ale corzilor.

Teoria-M și rețeaua de conexiuni

Există un proverb despre trei orbi și un elefant. Primul orb apucă fildeșul elefantului și descrie suprafața netedă și dură pe care o simte. Al doilea orb atinge un picior al elefantului. El descrie circumferința solidă și musculoasă pe care o simte. Cel de-al treilea orb apucă coada elefantului și descrie acest apendice subțire. Cum descrierile lor sunt atât de diferite, iar nici unul dintre ei nu-i poate vedea pe ceilalți doi, fiecare crede că a pus mâna pe un alt animal. Mulți ani fizicienii s-au aflat cam în aceeași beznă ca și cei trei orbi, închipuindu-și că cele trei teorii ale corzilor *erau* foarte diferite. Dar acum, grație noilor idei aduse de cea de-a doua revoluție a corzilor, fizicienii au înțeles că teoria-M este pachidermul unificator al celor cinci teorii ale corzilor.

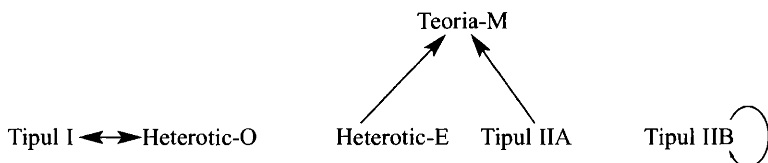


Figura 12.9 Săgeţile indică relaţiile de dualitate dintre teorii.

În acest capitol am văzut cum se schimbă perspectiva noastră asupra teoriei corzilor când ne aventurăm dincolo de domeniul perturbativ – cadru presupus implicit în capitolele anterioare. Figura 12.9 rezumă relaţiile pe care le-am descoperit până acum, săgeţile indicând teoriile duale. După cum se vede, avem o reţea de conexiuni, dar deocamdată ea nu e completă. Incluzând şi dualităţile din capitolul 10, putem completa reţeaua.

Să ne aducem aminte de dualitatea rază mare/mică prin care o dimensiune circulară de rază *R* se transformă într-una de rază 1/*R*. Am vorbit despre un aspect al acestei dualităţi, iar acum e momentul să-l lămurim. În capitolul 10 am discutat despre proprietăţile corzilor într-un univers cu o dimensiune circulară, fără a preciza care dintre cele cinci formulări e implicată. Am afirmat că, schimbând modurile de înfăşurare cu cele de vibraţie ale unei corzi, reformulăm exact descrierea teoretică a unui univers cu o dimensiune circulară de rază 1/*R* în termenii unui univers de rază *R*. Am văzut că între corzile Tipului IIA şi IIB există această relaţie de dualitate, iar la fel se întâmplă şi cu corzile Heterotice-O şi Heterotice-E. Definiţia mai riguroasă a dualităţii rază mare/mică e următoarea: proprietăţile fizice ale corzii IIA într-un univers cu o dimensiune circulară de rază *R* sunt absolut identice cu cele ale corzii IIB într-un univers cu o dimensiune circulară de rază 1/*R* (o afirmaţie similară e valabilă şi în cazul corzilor Heterotice-O şi Heterotice-E). Această precizare legată de dualitatea rază mare/mică nu schimbă concluziile capitolului 10, însă joacă un rol esenţial în discuţia de faţă.

Furnizând o legătură între teoriile Tipului IIA şi Tipului IIB, şi între teoriile Heterotică-O şi Heterotică-E, dualitatea rază mare/mică completează reţeaua de conexiuni, aşa cum e ilustrat prin liniile punctate din figura 12.10. Această figură arată că toate cele cinci teorii împreună cu teoria M sunt duale una în raport cu alta. Ele sunt toate împletite

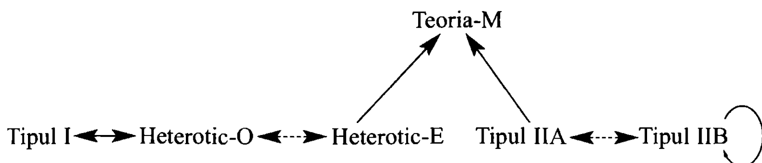


Figura 12.10 Incluzând dualitățile legate de forma geometrică a spațiului-timp (vezi capitolul 10), toate cele cinci teorii împreună cu teoria M sunt unite într-o rețea de dualități.

în același cadru teoretic unic și oferă cinci abordări diferite pentru a descrie unul și același substrat fizic. Pentru o anumită aplicație, una dintre formulări se poate dovedi mai eficientă decât alta. De exemplu, este mult mai ușor să folosim teoria Heterotică-O cuplată slab decât Tipul I cuplat tare. Cu toate acestea, ele descriu exact aceeași fizică.

Imaginea de ansamblu

Putem acum înțelege mai bine figurile 12.1 și 12.2 pe care le-am prezentat la începutul acestui capitol pentru a rezuma aspectele esențiale. În figura 12.1, vedem că înainte de 1995, fără luarea în considerare a dualităților, aveam cinci teorii distincte ale corzilor. Diferiți fizicieni lucrau la fiecare dintre ele, dar, fără înțelegerea dualităților, ele păreau teorii diferite. Fiecare dintre ele avea trăsături deosebite, de pildă valoarea constantei lor de cuplaj, forma geometrică și mărimea dimensiunilor încolăcite. Se spera, și încă se mai speră, ca aceste proprietăți definitorii să fie determinate de teoria însăși, dar neputând să le obțină din ecuațiile aproximative de care dispuneau, fizicienii au studiat fizica ce rezulta dintr-o gamă largă de posibilități. Lucrul acesta e reprezentat în figura 12.1 prin regiunile umbrite, fiecare punct dintr-o astfel de regiune corespunzând unei anumite alegeri a constantei de cuplaj și a geometriei dimensiunilor încolăcite. Fără a lua în considerare nici un fel de dualitate, avem cinci teorii disjuncte.

Dar dacă aplicăm toate dualitățile despre care am discutat, făcând să varieze parametrii geometrici și cei de cuplaj, putem trece de la oricare dintre teorii la alta, atât timp cât includem și regiunea centrală unificatoare a teoriei M, iar acest lucru e reprezentat de figura 12.2.

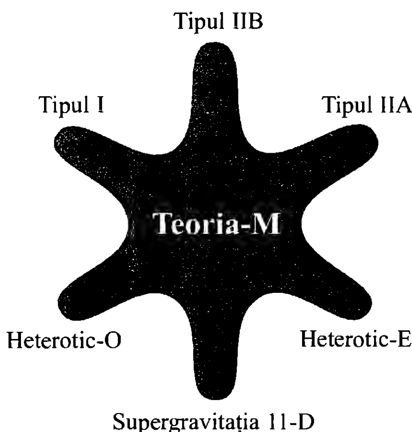


Figura 12.11 Prin includerea dualităților, toate cele cinci teorii ale corzilor, supergravitația în unsprezece dimensiuni și teoria M fuzionează într-un cadru unificat.

Chiar dacă știm foarte puține despre teoria M, aceste argumente indirecte susțin cu tărie ideea că ea reprezintă un substrat unificator pentru cele cinci teorii considerate, în mod naiv, distincte. În plus, am aflat că teoria M este intim legată de o a șasea teorie, supergravitația cu unsprezece dimensiuni, iar acest lucru este prezentat în figura 12.11, o versiune mai exactă a figurii 12.2.[110]

Figura 12.11 ilustrează faptul că ideile fundamentale și ecuațiile teoriei M, chiar dacă deocamdată sunt doar parțial înțelese, unifică toate formulările existente ale teoriei corzilor. Teoria M este elefantul teoretic care a deschis ochii fizicienilor asupra unui cadru unificator mult mai larg.

O caracteristică surprinzătoare a teoriei M: democrația în extindere

Când constanta de cuplaj e mică, în oricare dintre cele cinci regiuni peninsulare ale hărții teoriilor din figura 12.11 ingredientul fundamental pare a fi o coardă unidimensională. Acum însă putem privi această observație dintr-o nouă perspectivă. Dacă pornim din regiunile

Heterotic-E sau Tip IIA şi creştem valoarea constantelor de cuplaj respective, vom migra spre centrul hărţii 12.11, iar ceea ce păreau a fi corzi unidimensionale se vor întinde, transformându-se în membrane bidimensionale. În plus, printr-un şir mai mult sau mai puţin complicat al relaţiilor de dualitate care implică şi constanta de cuplaj, şi forma detaliată a dimensiunii spaţiale încolăcite, putem ajunge în mod lin şi continuu dintr-un punct arbitrar ales al figurii 12.11 în oricare altul. Cum membranele bidimensionale peste care am dat din perspectiva teoriilor Heterotic-E şi Tip IIA pot fi urmărite pe măsură ce migrăm spre oricare dintre celelalte trei formulări ale teoriei corzilor din figura 12.11, deducem că fiecare dintre cele cinci formulări implică de asemenea membrane bidimensionale.

Astfel, apar două întrebări. Mai întâi, sunt membranele bidimensionale adevăratul ingredient fundamental al teoriei corzilor? În al doilea rând, având în vedere saltul făcut din anii '70 şi începutul anilor '80 de la particulele punctiforme unidimensionale la corzile unidimensionale şi văzând acum că teoria corzilor implică de fapt membrane bidimensionale, e oare posibil să existe ingrediente cu şi mai multe dimensiuni în cadrul teoriei? Deocamdată nu putem da un răspuns complet la aceste întrebări, dar situaţia pare a fi următoarea.

Ne-am bazat pe supersimetrie pentru a înţelege câte ceva despre fiecare formulare a teoriei corzilor dincolo de domeniul de validitate al metodelor de aproximare perturbative. În particular, proprietăţile stărilor BPS, masele şi sarcinile lor de forţă sunt determinate în mod unic de supersimetrie, iar asta ne permite să înţelegem unele dintre caracteristicile lor de cuplaj tare, fără a fi obligaţi să efectuăm calcule directe de o dificultate inimaginabilă. De fapt, graţie eforturilor iniţiale ale lui Horowitz şi Strominger şi lucrărilor de pionierat ale lui Polchinski, acum ştim mai multe despre aceste stări BPS. Nu numai că le cunoaştem masele şi sarcinile de forţă, dar înţelegem foarte bine şi cum *arată* aceste stări. Iar această imagine este poate cel mai surprinzător rezultat care s-a obţinut. Unele dintre stările BPS sunt corzi unidimensionale. Altele sunt membrane bidimensionale. Aceste forme ne sunt deja familiare. Surpriza e că există şi forme *tridimensionale*, *cvadridimensionale* etc., până la *nouă* dimensiuni spaţiale inclusiv. Teoria corzilor, teoria M, sau oricum va fi numită în final, conţine de fapt obiecte extinse, având o gamă largă de dimensiuni spaţiale. Fizicienii au numit tri-brane obiectele extinse cu trei dimensiuni spaţiale,

patru-brane pe cele cu patru dimensiuni spațiale, și așa mai departe până la nouă-brane (în general, pentru obiectele cu *p* dimensiuni spațiale, unde *p* este un număr întreg, fizicienii folosesc denumirea de *p-brană*). Uneori, folosind această terminologie, corzile sunt numite 1-brane, iar membranele 2-brane. Faptul că toate aceste obiecte extinse fac parte din teorie l-a făcut pe Paul Townsend să vorbească despre „democrația branelor".

Neconformându-se democrației branelor, corzile – obiecte extinse unidimensionale – sunt deosebite din următorul motiv. Fizicienii au arătat că masa obiectelor extinse de orice dimensiune, cu excepția corzilor unidimensionale, este *invers* proporțională cu valoarea constantei de cuplaj a corzii asociate, pentru orice regiune din cele cinci ale figurii 12.11. Asta înseamnă că la cuplaj slab, în oricare dintre cele cinci formulări, cu excepția corzilor, toate vor fi extrem de masive – cu ordine de mărime mai grele decât masa Planck. Datorită faptului că sunt atât de grele și deci, conform relației $E=mc^2$, necesită o energie inimaginabil de mare pentru a fi produse, branele au doar o mică influență asupra majorității proprietăților fizice (nu însă asupra tuturor proprietăților, așa cum vom vedea în următorul capitol). Dar când ne aventurăm în afara regiunilor peninsulare ale figurii 12.11, branele cu mai multe dimensiuni devin mai ușoare, deci din ce în ce mai importante.[111]

În consecință, imaginea pe care trebuie s-o aveți este următoarea. În zona centrală a figurii 12.11 avem o teorie ale cărei ingrediente fundamentale nu sunt numai corzi și membrane, ci „brane" de diverse dimensiuni, toate aflate, mai mult sau mai puțin, pe picior de egalitate. Deocamdată nu cunoaștem multe trăsături esențiale ale acestei teorii atotcuprinzătoare. Ceea ce știm este că, pe măsură ce ne deplasăm din regiunea centrală spre oricare dintre regiunile peninsulare, doar corzile (sau membranele înfășurate așa încât să arate asemeni corzilor, ca în figurile 12.7 și 12.8) sunt suficient de ușoare pentru a avea legătură cu fizica pe care o cunoaștem noi – particulele din tabelul 1.1 și cele patru forțe prin care ele interacționează. Analiza perturbativă de care s-au folosit teoreticienii corzilor timp de aproape două decenii nu a fost perfecționată suficient pentru a descoperi măcar existența obiectelor extinse supermasive de alte dimensiuni; corzile au dominat analiza și prin urmare teoriei i s-a dat numele total nedemocratic de teoria corzilor. În aceste regiuni ale figurii 12.11 suntem îndreptățiți,

din mai multe motive, să ignorăm totul cu excepţia corzilor. În esenţă, aşa am procedat până acum în această carte. Vedem însă că teoria este mult mai bogată decât ne-am fi imaginat vreodată.

Răspund toate acestea la întrebările rămase în suspensie în teoria corzilor?

Da şi nu. Am reuşit să adâncim înţelegerea noastră scăpând de anumite concluzii care, privind retrospectiv, se datorau mai curând analizei aproximaţiei perturbative decât fizicii corzilor, însă capacitatea actuală a metodelor noastre neperturbative e destul de limitată. Descoperirea remarcabilei reţele de relaţii de dualitate ne oferă o perspectivă mai largă asupra teoriei corzilor, dar multe probleme rămân încă nerezolvate. Pentru moment, de exemplu, nu ştim cum să depăşim ecuaţiile aproximative pentru valoarea constantei de cuplaj a corzilor – ecuaţii care, aşa cum am văzut, sunt prea grosiere pentru a ne da vreo informaţie utilă. Nu ştim nici de ce sunt exact trei dimensiuni spaţiale extinse sau cum să alegem forma detaliată a dimensiunilor încolăcite. Răspunsurile la aceste întrebări necesită metode neperturbative mult mai puternice decât cele de care dispunem în prezent.

Am ajuns totuşi la o înţelegere mai profundă a structurii logice şi a posibilităţilor teoretice ale teoriei corzilor. Înaintea descoperirilor rezumate în figura 12.11, comportamentul la cuplaj tare al fiecăreia dintre cele cinci teorii era o cutie neagră, un mister total. La fel ca în cazul hărţilor din vechime, domeniul cuplajului tare era necartografiat şi putea fi plin de balauri şi monştri marini. Acum vedem însă că, deşi călătoria spre cuplajul tare ne va duce prin regiuni necunoscute ale teoriei M, ne va duce în cele din urmă înapoi în domeniul confortabil al cuplajului slab – dar în limbajul dual a ceea ce credeam înainte a fi o teorie diferită a corzilor.

Dualitatea şi teoria M unifică cele cinci teorii ale corzilor şi sugerează o concluzie importantă. S-ar putea foarte bine să nu mai apară alte surprize de genul celor prezentate până acum. Odată ce un cartograf poate completa fiecare regiune a globului terestru, harta este definitivă şi cunoaşterea geografică completă. Asta nu înseamnă că explorările în Antarctica sau într-o insulă izolată din Micronezia nu mai

au nici un merit ştiinţific sau cultural, ci doar că epoca descoperirilor geografice s-a încheiat. Absenţa petelor albe de pe glob ne-o garantează. „Harta teoriilor“ din figura 12.11 joacă un rol asemănător pentru teoreticienii corzilor. Ea acoperă toată gama de teorii la care se poate ajunge pornind de la oricare dintre cele cinci construcţii ale corzilor. Deşi suntem departe de a înţelege pământul necunoscut al teoriei M, nu există regiuni necartografiate. Asemeni cartografului, teoreticianul corzilor poate pretinde acum cu optimism moderat că spectrul teoriilor logic valide care încorporează descoperirile esenţiale ale secolului trecut – relativitatea specială şi generală; mecanica cuantică; teoriile de etalonare ale forţelor tari, slabe şi electromagnetice; supersimetria; dimensiunile suplimenatare ale lui Kaluza şi Klein – sunt toate cartografiate în figura 12.11.

Provocarea pentru teoreticianul corzilor – sau, mai bine zis, pentru M-teoreticianul – este de a arăta că *un* punct oarecare al hărţii din figura 12.11 descrie cu adevărat universul nostru. Pentru a reuşi, trebuie găsite ecuaţiile complete şi exacte ale căror soluţii vor corespunde acestui punct de pe hartă, iar apoi trebuie înţeleasă fizica subiacentă suficient de precis pentru a putea face comparaţii cu experimentul. După cum spunea Witten, „înţelegerea a ceea ce este cu adevărat teoria M va transforma viziunea noastră asupra lumii cel puţin la fel de drastic ca în cazul celorlalte mari revoluţii ştiinţifice din trecut.“[112] Acesta este programul de unificare pentru secolul XXI.

CAPITOLUL 13

Găurile negre din perspectiva corzilor și a teoriei M

Contradicția dintre teoria generală a relativității și mecanica cuantică, existentă înainte de teoria corzilor, era un afront adus credinței noastre adânc înrădăcinate că legile naturii ar trebui să alcătuiască un întreg perfect coerent. Dar acest antagonism a fost mai mult decât o separare abstractă radicală. Condițiile fizice extreme din momentul big bang-ului care continuă să existe în interiorul găurilor negre *nu pot* fi înțelese fără o formulare cuantică a forței gravitaționale. Odată cu descoperirea teoriei corzilor, putem spera acum să dezlegăm aceste mistere adânci. În capitolul de față și în următorul vom vedea cât de departe au ajuns teoreticienii corzilor în înțelegerea găurilor negre și originii universului.

Găurile negre și particulele elementare

La prima vedere e greu să ne imaginăm două lucruri mai diferite decât găurile negre și particulele elementare. De regulă, ne închipuim că găurile negre sunt cele mai grele corpuri cerești, în timp ce particulele elementare sunt cele mai mici fărâme de materie. Cercetările întreprinse pe la sfârșitul anilor '60 și începutul anilor '70 de fizicieni precum Demetrios Christodoulou, Werner Israel, Richard Price, Brandon Carter, Roy Kerr, David Robinson, Hawking și Penrose au arătat că găurile negre și particulele elementare nu sunt chiar atât de diferite pe cât ni le imaginăm. Acești fizicieni au găsit dovezi din ce în ce mai convingătoare pentru ceea ce John Wheeler a rezumat prin afirmația „găurile negre nu au păr". Wheeler a vrut să spună că, cu excepția

unui mic număr de trăsături distinctive, găurile negre par a fi asemănătoare. Care sunt trăsăturile distinctive? Prima este, bineînțeles, masa găurii negre. Care sunt celelalte? Cercetările au arătat că acestea ar fi sarcina electrică și alte sarcini de forță pe care o gaură neagră le poate avea, precum și frecvența cu care ea se rotește în jurul axei sale. Și asta e tot. Orice două găuri negre cu aceeași masă, aceleași sarcini de forță și aceeași rotație (spin) sunt complet identice. Găurile negre nu au „coafuri" deosebite – adică alte trăsături intrinseci – care să le distingă una de alta. Asta ar trebui să ne dea de gândit. Să nu uităm că exact asemenea proprietăți – masă, sarcină de forță și spin – fac diferența dintre o particulă elementară și alta. Similitudinea dintre trăsăturile definitorii i-a făcut pe numeroși fizicieni de-a lungul anilor să emită ipoteza că găurile negre ar putea fi în realitate particule elementare gigantice.

De fapt, conform teoriei lui Einstein, nu există o masă minimă pentru o gaură neagră. Dacă strivim o bucată de materie de masă oarecare până la o dimensiune suficient de mică, conform teoriei generale a relativității, ea va deveni o gaură neagră. (Cu cât masa e mai mică, cu atât trebuie să o strivim mai mult). Astfel, ne putem imagina un experiment mintal în care începem prin a strivi fragmente de masă din ce în ce mai mică obținând găuri negre din ce în ce mai mici, iar apoi comparăm proprietățile acestor găuri negre cu proprietățile particulelor elementare. Afirmația lui Wheeler ne duce la concluzia că, pentru mase suficient de mici, găurile negre pe care le obținem prin acest procedeu sunt destul de asemănătoare cu particulele elementare. Ambele vor fi asemenea unor pachete minuscule complet caracterizate prin masă, sarcini de forță și spin.

Dar aici apare o problemă. Găurile negre astrofizice care au masele de câteva ori mai mari decât cea a Soarelui sunt atât de întinse și grele, încât mecanica cuantică este irelevantă și doar ecuațiile teoriei generale a relativității pot fi folosite pentru înțelegerea proprietăților lor. (E vorba aici de structura de ansamblu a găurii negre, nu de punctul unic central al colapsului din interiorul găurii negre, a cărui dimensiune minusculă necesită, în mod sigur, o descriere cuantică.) În încercarea noastră de a crea găuri negre din ce în ce mai mici, se ajunge totuși la situația în care ele devin atât de mici și ușoare, încât mecanica cuantică *trebuie* să intre în scenă. Acest lucru se întâmplă dacă masa totală a găurii negre are o valoare comparabilă cu masa Planck sau mai mică

decât ea. (Din punctul de vedere al fizicii particulelor elementare, masa Planck este uriaşă, aproximativ zece miliarde de miliarde de ori masa protonului. Din punctul de vedere al găurilor negre, masa Planck, fiind egală cu cea a unui grăunte de praf mediu, este minusculă.) Astfel, fizicienii care au presupus că găurile negre minuscule şi particulele elementare ar putea fi strâns legate s-au lovit de incompatibilitatea dintre teoria generală a relativităţii, care stă la baza teoriei găurilor negre, şi mecanica cuantică. În trecut, această incompatibilitate bloca orice progres în această direcţie fascinantă.

Oare teoria corzilor ne permite să mergem mai departe?

Da, ne permite. Printr-un rezultat neaşteptat şi subtil privind găurile negre, teoria corzilor ne furnizează prima legătură teoretică viabilă între găurile negre şi particulele elementare. Calea spre această legătură este ocolită, dar ne conduce prin cele mai interesante rezultate ale teoriei corzilor, făcând ca această călătorie să merite efortul.

Totul începe de la o întrebare pe care şi-au pus-o fizicienii pe la sfârşitul anilor 1980 şi care pare fără legătură cu subiectul nostru. Matematicienii şi fizicienii ştiu de mult că atunci când şase dimensiuni spaţiale sunt încolăcite alcătuind o formă Calabi-Yau, în general există două tipuri de sfere încorporate în textura spaţiului. Primul tip sunt sferele bidimensionale, asemeni suprafeţei unei mingi, cele care au jucat un rol esenţial în tranziţiile cu inversie şi ruptură a spaţiului despre care am discutat în capitolul 11. Celălalt tip este mai greu de imaginat, dar e la fel de răspândit. Este vorba despre sfere *tridimensionale*, asemănătoare cu suprafeţele mingilor dintr-un univers cu *patru* dimensiuni spaţiale. Bineînţeles, după cum am văzut în capitolul 11, o minge normală în lumea noastră este un obiect tridimensional, dar a cărui *suprafaţă*, asemenea suprafeţei furtunului, este bidimensională, fiind necesare doar două numere, de exemplu latitudinea şi longitudinea, pentru a localiza orice poziţie de pe suprafaţa lui. Acum ne închipuim însă că mai avem o dimensiune spaţială: o minge cu patru dimensiuni a cărei suprafaţă este tridimensională. Cum e aproape imposibil să ne imaginăm o asemenea minge, în general vom apela la analogii

cu mai puține dimensiuni, care sunt mai ușor de vizualizat. Dar, după cum vom vedea, există un aspect foarte important al naturii tridimensionale a suprafețelor sferice.

Prin studiul ecuațiilor teoriei corzilor, fizicienii au înțeles că e posibil, și chiar probabil, ca odată cu trecerea timpului aceste sfere tridimensionale să se restrângă – să colapseze – până la dispariție. Teoreticienii corzilor s-au întrebat ce s-ar întâmpla dacă textura spațiului s-ar micșora într-o manieră asemănătoare. Ar exista vreun efect catastrofal provocat de aceste gâtuiri ale texturii spațiale? Întrebarea e destul de asemănătoare celei la care am răspuns în capitolul 11, cu deosebirea că aici ne concentrăm asupra colapsului sferelor tridimensionale, în timp ce în capitolul 11 era vorba doar despre colapsul celor bidimensionale. (La fel ca în capitolul 11, când doar o parte a formei Calabi-Yau se micșorează, și nu întreaga formă Calabi-Yau, nu se aplică identificarea rază mică/mare din capitolul 10.) Aceasta este diferența calitativă esențială la schimbarea dimensiunii.[113] Să ne amintim din capitolul 11 că o descoperire crucială este aceea că, în deplasarea lor prin spațiu, corzile pot prinde ca într-un lassou o sferă bidimensională. Adică suprafața bidimensională a foii lor de univers poate înconjura complet o sferă bidimensională, ca în figura 11.6. Aceasta se dovedește a fi de ajuns pentru a proteja o sferă bidimensională care colapsează, evitându-se astfel o catastrofă fizică. Acum însă studiem un alt tip de sferă din interiorul spațiului Calabi-Yau, iar aceasta are mult prea multe dimensiuni pentru a fi înconjurată de o coardă în mișcare. Dacă vă e greu să vizualizați acest lucru, putem scădea toate dimensiunile cu o unitate. Să ne închipuim sferele tridimensionale ca și cum ar fi suprafețe bidimensionale ale mingilor normale, dar în cazul acesta trebuie să ne imaginăm și corzile unidimensionale ca fiind particule punctiforme zero-dimensionale. Atunci, la fel cum o particulă punctiformă zero-dimensională nu poate înconjura nimic, și cu atât mai puțin o sferă bidimensională, nici o coardă unidimensională nu va putea înconjura o sferă tridimensională.

Un asemenea raționament i-a făcut pe teoreticienii corzilor să emită ipoteza că, dacă o sferă tridimensională din interiorul unui spațiu Calabi-Yau ar colapsa, ceea ce e perfect posibil conform ecuațiilor aproximative ale teoriei corzilor, ar putea produce un cataclism. De fapt, ecuațiile aproximative ale teoriei corzilor, obținute înainte de 1990, păreau să indice că legile universului n-ar mai funcționa în eventua-

litatea producerii unui asemenea colaps; ecuațiile conduceau la concluzia că unele dintre cantitățile infinite care fuseseră eliminate de teoria corzilor vor reapărea ca urmare a unei astfel de străpungeri a texturii spațiale. Timp de mulți ani, teoreticienii au trebuit să se mulțumească cu acest rezultat tulburător, dar incomplet. În 1995 însă, Andrew Strominger a demonstrat că aceste speculații catastrofice erau false.

Călăuzit de cercetările lui Witten și Seiberg, Strominger s-a folosit de descoperirea că teoria corzilor, dacă este analizată cu noua precizie oferită de cea de-a doua revoluție a supercorzilor, nu este doar o teorie a corzilor unidimensionale. El a făcut următorul raționament. O coardă unidimensională – o brană unidimensională, cum e ea numită în noul limbaj – poate înconjura complet un fragment unidimensional al spațiului, de exemplu un cerc, așa cum se vede în figura 13.1. (Să observăm diferența față de figura 11.6 în care o coardă unidimensională evoluează în timp și înconjoară o sferă bidimensională. Figura 13.1 trebuie privită ca un instantaneu luat la un anumit moment de timp.) În mod asemănător, vedem în figura 13.1 că o membrană bidimensională – o 2-brană – se poate înfășura și poate acoperi complet o sferă bidimensională, la fel cum un ambalaj din plastic poate împacheta strâns o portocală. Deși e mai greu de vizualizat, Strominger a urmat aceeași strategie și a înțeles că nou descoperitele ingrediente tridimensionale din teoria corzilor – 3-branele – pot înconjura o sferă tridimensională și o pot acoperi complet. Strominger a demonstrat apoi cu ajutorul unui calcul simplu că 3-brana oferă un scut de protecție perfect care anulează cu precizie toate potențialele efecte cataclismice de care se temuseră înainte teoreticienii corzilor că ar apărea dacă o sferă tridimensională ar colapsa.

A fost o descoperire importantă și minunată. Dar întregul ei potențial a fost dezvăluit ceva mai târziu.

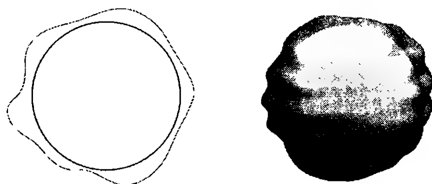


Figura 13.1 O coardă poate încercui o bucată de textură spațială înfășurată unidimensională, o membrană bidimensională poate înconjura un fragment bidimensional.

Ruperea texturii spațiale

Unul dintre cele mai interesante lucruri legate de fizică este că nivelul cunoștințelor se poate schimba literalmente peste noapte. În dimineața următoare publicării pe internet a lucrării lui Strominger, o citeam deja, așezat la biroul meu din Cornell. Dintr-o singură lovitură, Strominger rezolvase una dintre cele mai spinoase probleme legate de încolăcirea dimensiunilor suplimentare într-un spațiu Calabi-Yau. Dar, pe când îi analizam articolul, mi-am dat seama că era posibil să fi rezolvat doar o jumătate a problemei.

În lucrările mai vechi privind tranziția cu inversie și ruptura spațiului, prezentate în capitolul 11, am studiat un proces format din două părți, în care o sferă bidimensională se restrânge până la un punct, provocând ruperea texturii spațiale, după care se umflă la loc pe altă cale, reparând astfel ruptura. În lucrarea sa, Strominger a studiat ce se întâmplă când o sferă tridimensională se contractă până la un punct și a demonstrat că obiectele extinse ale teoriei corzilor asigură un comportament fizic cuminte. Dar aici se oprea articolul lui. Putea oare exista o parte a doua a poveștii, în care spațiul rupt să se repare prin reumflarea unor sfere?

În primăvara lui 1995, Dave Morrison se afla la Universitatea Cornell și în acea după-amiază ne-am întâlnit pentru a discuta despre articolul lui Strominger. În câteva ore aveam deja o schiță a ceea ce putea fi „partea a doua a poveștii". Inspirați de ideile de pe la sfârșitul anilor '80 ale matematicienilor Herb Clemens de la Universitatea din Utah, Robert Friedman de la Universitatea Columbia și Miles Reid de la Universitatea din Warwick, așa cum au fost ele aplicate de Candelas, Green și Tristan Hübsch de la Universitatea Texas din Austin, ne-am dat seama că atunci când o sferă tridimensională colapsează, ar fi posibil ca spațiul Calabi-Yau să se rupă, pentru ca apoi să se repare singur prin reumflarea sferei. Dar aici apare o surpriză interesantă. În timp ce sfera care a colapsat avea trei dimensiuni, cea care se reumflă are doar *două*. E greu de imaginat cum arată așa ceva, dar ne putem face o idee printr-o analogie în mai puține dimensiuni. În loc de cazul greu de imaginat al sferei tridimensionale care colapsează și este apoi înlocuită de o sferă bidimensională, să ne închipuim că o sferă *unidimensională* colapsează și e înlocuită de o sferă *zero*-dimensională.

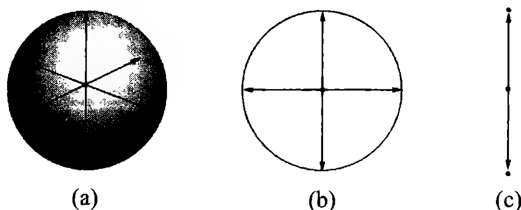


Figura 13.2 Sfere de dimensiuni care pot fi uşor vizualizate – bidimensionale (a), unidimensionale (b) şi zero-dimensionale (c).

Mai întâi, ce înseamnă sfere uni şi zero-dimensionale? Să judecăm prin analogie. O sferă bidimensională este o mulţime de puncte dintr-un spaţiu tridimensional care se află la aceeaşi distanţă faţă de un centru dat, după cum se vede în figura 13.2 (a). Urmând aceeaşi idee, o sferă unidimensională, este mulţimea de puncte din spaţiul bidimensional (de exemplu, suprafaţa acestei pagini) care sunt la aceeaşi distanţă fată de un centru dat. Aşa cum e ilustrat în figura 13.2 (b), este vorba despre un cerc. Ducând metoda mai departe, o sferă zero-dimensională este o mulţime de puncte dintr-un spaţiu unidimensional (o linie) care sunt la aceeaşi distanţă faţă de un centru dat. Aşa cum se vede din figura 13.2 (c), aceasta se rezumă la *două puncte*, având „raza" sferei zero-dimensionale egală cu distanţa la care se află fiecare punct faţă de centrul comun. Astfel, analogia într-un număr mai mic de dimensiuni din paragraful precedent implică un cerc (o sferă unidimensională) care se contractă, având ca urmare ruperea spaţiului, şi apoi e înlocuit cu o sferă zero-dimensională (două puncte). În figura 13.3 este reprezentată această idee abstractă.

Să ne închipuim că pornim de la suprafaţa unui covrig, în care este încorporată o sferă unidimensională (un cerc), aşa cum se vede în

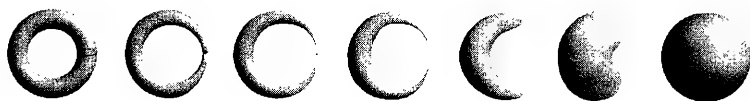


Figura 13.3 Un cerc de pe un covrig (tor) colapsează până la un punct. Suprafaţa se rupe, producând două găuri de străpungere. O sferă zero-dimensională (două puncte) „se lipeşte" în acel loc, înlocuind sfera unidimensională iniţială (cercul) şi reparând în acest fel suprafaţa ruptă. Acest lucru permite transformarea într-o formă total diferită – o minge.

figura 13.3. Să ne imaginăm că, odată cu trecerea timpului, cercul colapsează, făcând ca textura spaţiului să fie gâtuită. Putem repara gâtuirea permiţând texturii să se rupă momentan şi apoi înlocuind sfera unidimensională îngustată – cercul colapsat – cu o sferă zero-dimensională – două puncte – astupând găurile din porţiunile de jos şi de sus ale formei apărute datorită rupturii. Aşa cum se vede în figura 13.3, forma rezultată arată ca o banană deformată, căreia, printr-o deformare uşoară (fără ruperea spaţiului), i se poate da o nouă formă asemănătoare unei mingi. Se vede deci că dacă o sferă unidimensională colapsează şi este înlocuită printr-o sferă zero-dimensională, topologia covrigului iniţial, adică forma lui fundamentală, este drastic alterată. În contextul dimensiunilor spaţiale încolăcite, procesul de rupere a spaţiului din figura 13.3 s-ar traduce prin trecerea de la universul reprezentat în figura 8.8 la cel reprezentat în figura 8.7.

Deşi e vorba despre o analogie în mai puţine dimensiuni, ea exprimă caracteristicile esenţiale a ceea ce Morrison şi cu mine am prevăzut pentru cea de-a două parte a poveştii lui Strominger. După colapsul sferei tridimensionale în interiorul spaţiului Calabi-Yau, ne-am gândit că spaţiul se poate rupe, iar apoi se poate repara singur prin creşterea unei sfere bidimensionale, ducând la schimbări şi mai drastice ale topologiei decât cele anticipate de noi şi de Witten în lucrările noastre anterioare (prezentate în capitolul 11). Astfel, o formă Calabi-Yau ar putea să se transforme într-o formă Calabi-Yau complet diferită – aşa cum covrigul se transformă într-o minge în figura 13.3 –, iar cu fizica corzilor nu se întâmplă nimic deosebit. Deşi începuse să se contureze o imagine, ştiam că mai erau de lămurit multe aspecte înainte de a putea dovedi că versiunea noastră pentru partea a doua a poveştii nu introduce nici un fel de singularităţi, adică consecinţe periculoase şi fizic inacceptabile. În seara aceea ne-am întors fiecare acasă cu sentimentul că eram pe punctul de a face o descoperire importantă.

O ploaie de mesaje

A doua zi de dimineaţă am primit un telefon de la Strominger care dorea să ştie ce reacţii sau comentarii provocase lucrarea lui. A spus că „se leagă cumva şi de lucrările tale cu Aspinwall şi Morrison“,

pentru că, aşa cum s-a dovedit ulterior, şi el încercase să găsească o legătură cu fenomenul de schimbare de topologie. I-am trimis imediat un e-mail în care i-am prezentat lucrurile din perspectiva lui Morrison şi a mea. Când mi-a răspuns, era clar că simţea aceeaşi emoţie ca noi cu o zi în urmă.

În cursul următoarelor zile, un şuvoi de e-mailuri au circulat între noi trei, încercând cu înfrigurare să dăm rigoare cantitativă ideii noastre de schimbare drastică a topologiei cu ruptura spaţiului. Încet, dar sigur, detaliile au început să-şi găsească locul potrivit. Până miercurea următoare, la o săptămână după ce Strominger îşi publicase descoperirea iniţială, întocmiserăm deja o ciornă a unui articol comun ce descria noua transformare spectaculosă a texturii spaţiale care poate rezulta din colapsul unei sfere tridimensionale.

Strominger trebuia să susţină în ziua următoare un seminar la Harvard, aşa că a plecat din Santa Barbara de dimineaţă. Stabiliserăm ca Morison şi cu mine să continuăm să cizelăm articolul pentru ca apoi să-l trimitem în aceeaşi seară la arhiva electronică. Până la 11:45 am verificat şi răsverificat calculele făcute de noi şi totul părea să se potrivească perfect. Aşa că, am trimis electronic lucrarea şi am părăsit clădirea departamentului de fizică. Pe când Morrison şi cu mine ne îndreptam spre maşina mea (urma să-l conduc spre locuinţa pe care o închiriase pe toată durata semestrului) am început să ne închipuim cele mai dure critici pe care cineva hotărât să nu accepte nici în ruptul capului poziţia noastră le-ar putea aduce. Pe când ieşeam din parcare şi părăseam campusul, ne-am dat seama că, deşi argumentele noastre erau solide şi convingătoare, nu erau de nezdruncinat. Nici unul din noi nu credea că ar fi ceva cu adevărat în neregulă, dar recunoşteam că forţa argumentelor noastre şi formularea aleasă în unele locuri din articol ar fi putut lăsa loc unor discuţii răuvoitoare, care ar fi putut umbri importanţa rezultatelor noastre. Am căzut de acord că ar fi fost mai bine dacă am fi scris pe un ton mai moderat, pentru ca fizicienii s-o judece după valoarea ei, fără a reacţiona la forma ei de prezentare.

Pe când conduceam mai departe, Morrison mi-a amintit că, în conformitate cu regulile arhivei electronice, aveam dreptul să ne revizuim lucrarea până la 2 noaptea, oră de la care urma să fie lansată pe Internet pentru accesul public. Am întors imediat maşina, am revenit la clădirea departamentului de fizică, am retras articolul iniţial şi ne-am apucat de lucru pentru a domoli tonul. Din fericire, acest lucru a fost uşor de făcut. Schimbarea câtorva cuvinte în paragrafele-cheie a diminuat

pretenţiile noastre, fără a compromite conţinutul tehnic al lucrării. Într-o oră reuşisem să trimitem din nou lucrarea, şi am convenit să nu mai vorbim deloc despre ea pe drumul spre casa lui Morrison.

În ziua următoare, pe la amiază, era deja evident că articolul nostru fusese primit cu entuziasm. Printre numeroasele mesaje de răspuns era şi cel al lui Plesser, care ne-a felicitat spunând: „Aş fi vrut să mă fi gândit eu la asta!“ În ciuda temerilor noastre din noaptea precedentă, convinseserăm comunitatea teoreticienilor nu numai că textura spaţiului se poate rupe în modul descoperit anterior (capitolul 11), dar că se pot produce şi rupturi mult mai grave, de genul celor ilustrate în figura 13.3.

Înapoi la găurile negre şi la particulele elementare

Ce legătură are asta cu găurile negre şi cu particulele elementare? Ei bine, are! Pentru a înțelege, va trebui să ne punem aceeaşi întrebare pe care ne-am pus-o şi în capitolul 11. Care sunt consecințele fizice observabile ale acestor ruperi ale texturii spaţiale? Aşa cum am mai văzut, pentru tranzițiile cu inversie, răspunsul la această întrebare a fost surprinzător, şi anume că nu se întâmplă nimic. În cazul *tranzițiilor conice* – acesta a fost denumirea tehnică aleasă pentru noile tranziții cu rupere drastică a spațiului – nu apar catastrofe fizice (cum s-ar întâmpla în convențională teorie generală a relativităţii), dar există consecințe observabile mai pronunţate.

Două noțiuni înrudite stau la baza acestor consecințe observabile, şi le vom explica pe rând. Mai întâi, după cum am văzut, Strominger a descoperit inițial că o sferă tridimensională aflată într-un spaţiu Calabi-Yau poate colapsa fără a produce un dezastru, pentru că există o tri-brană înfăşurată în jurul ei care-i asigură un scut protector perfect. Dar cum arată oare configurația unei asemenea brane înfăşurate? Răspunsul vine din lucrările anterioare ale lui Horowitz şi Strominger, care au arătat că pentru noi, cei care cunoaştem în mod direct numai trei dimensiuni spațiale, 3-brana întinsă în jurul sferei tridimensionale va produce un câmp gravitațional care arată la fel cu cel al unei găuri negre.[114] Acest lucru *nu este evident* şi devine clar abia după studiul detaliat al ecuațiilor care guvernează branele. Şi, din nou, este greu să desenăm asemenea configurații cu mai multe dimensiuni, însă figura 13.4

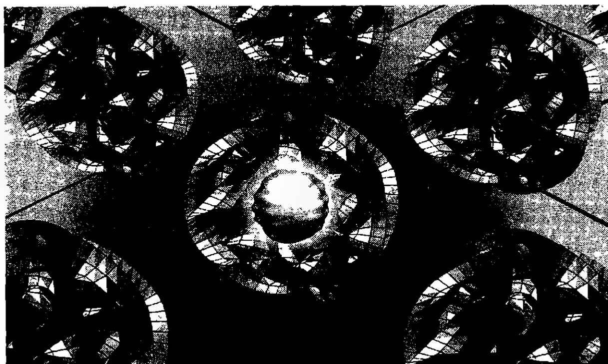


Figura 13.4 Când o brană înconjoară o sferă care se află în dimensiunile încolăcite, ea va apărea ca o gaură neagră în familiarele dimensiuni extinse.

ne dă o idee prin analogia cu cazul unui număr mai mic de dimensiuni implicând sfere bidimensionale. Observăm că o membrană bidimensională poate înconjura o sferă bidimensională (care e în interiorul unui spațiu Calabi-Yau aflat într-un anumit loc din dimensiunile extinse). Cineva care privește prin dimensiunile extinse spre acel loc va detecta brana care o înconjoară datorită masei ei și sarcinilor ei de forță, proprietăți despre care Horowitz și Strominger arătaseră că sunt asemănătoare cu cele ale găurilor negre. Mai mult, Strominger a arătat în lucrarea sa din 1995 că masa unei 3-brane, adică masa găurii negre, este proporțională cu volumul sferei tridimensionale pe care o înconjoară; cu cât volumul sferei este mai mare, cu atât trebuie să fie mai mare 3-brana pentru a o înconjura, deci cu atât va fi mai masivă. În mod asemănător, cu cât volumul sferei este mai mic, cu atât și masa 3-branei care o înconjoară este mai mică. Când se produce colapsul acestei sfere, 3-brana din jurul sferei, care este percepută ca o gaură neagră, pare să devină din ce în ce mai ușoară. Când sfera tridimensională a colapsat până la punctul de ruptură, gaura neagră corespunzătoare are masă nulă. Deși sună foarte ciudat – ce să însemne o gaură neagră fără masă? – în curând vom face legătura dintre această enigmă și domenii ale fizicii corzilor care ne sunt mai familiare.

Al doilea lucru pe care trebuie să ni-l amintim este că, după cum am văzut în capitolul 9, numărul de găuri dintr-o formă Calabi-Yau determină numărul modurilor de vibrație de energie joasă, deci și de masă mică, moduri ce ar putea reprezenta particulele din tabelul 1.1,

precum şi particulele de forţă. Cum tranziţiile conice cu ruperea spaţiului modifică numărul de găuri (ca, de exemplu, în figura 13.3, unde gaura covrigului este eliminată prin procesul de rupere/reparare), ne aşteptăm la o schimbare a numărului modurilor de vibraţie de masă mică. Şi într-adevăr, când Morrison, Strominger şi cu mine am cercetat acest lucru în detaliu, am descoperit că atunci când o nouă sferă bidimensională înlocuieşte sfera tridimensională colapsată din dimensiunile Calabi-Yau încolăcite, numărul modurilor de vibraţie de masă nulă ale corzii creşte exact cu unu. (Exemplul covrigului care se transformă într-o minge din figura 13.3 ne-ar putea face să credem că numărul de găuri, deci şi numărul modurilor, scade, însă acesta e un rezultat înşelător al analogiei într-un număr mai mic de dimensiuni.)

Pentru a combina observaţiile din ultimele două paragrafe, să ne imaginăm un şir de instantanee ale unui spaţiu Calabi-Yau în care mărimea unei anumite sfere tridimensionale scade continuu. Prima observaţie implică faptul că o 3-brană care înconjoară această sferă tridimensională – ce ne apare ca o gaură neagră – va avea o masă din ce în ce mai mică până când, în punctul final al colapsului, va avea masă nulă. Dar, aşa cum ne-am întrebat mai sus, ce înseamnă asta? Răspunsul devine clar făcând apel la a doua observaţie. Lucrările noastre au arătat că noul mod de vibraţie de masă nulă al corzii, care apare datorită tranziţiei conice cu ruperea spaţiului, *este descrierea microscopică a unei particule cu masă nulă în care s-a transformat gaura neagră.* Am dedus că, atunci când o formă Calabi-Yau suferă o tranziţie conică cu ruperea spaţiului, o gaură neagră care este iniţial masivă devine din ce în ce mai uşoară până ajunge să nu aibă masă, pentru ca apoi să se transforme într-o particulă fără masă – cum e fotonul – care în teoria corzilor nu e decât o coardă aflată într-un anumit mod de vibraţie. Astfel, pentru prima dată, teoria corzilor stabileşte o legătură directă, concretă şi cantitativă între găurile negre şi particulele elementare.

„Topirea" găurilor negre

Noua legătură dintre găurile negre şi particulele elementare este foarte asemănătoare cu ceva cunoscut din viaţa de zi cu zi: tranziţiile de fază. Un exemplu simplu de tranziţie de fază este cel menţionat în

capitolul anterior: apa poate exista sub formă solidă (gheață), lichidă (apă lichidă) și gazoasă (abur). Aceste stări de agregare poartă numele de *faze ale* apei, iar transformarea de la o fază la alta se numește tranziție de fază. Morrison, Strominger și cu mine am demonstrat că există o strânsă analogie matematică și fizică între aceste tranziții de fază și tranzițiile conice cu ruperea spațiului de la o formă Calabi-Yau la alta. Din nou, la fel cum cineva care nu a mai întâlnit apă lichidă sau gheață nu va recunoaște imediat că ele constituie două faze ale aceleiași substanțe de bază, fizicienii nu înțeleseseră că tipurile de găuri negre pe care le studiam și particulele elementare erau de fapt două faze ale aceleiași materii de bază: coarda. După cum temperatura înconjurătoare determină faza în care se va găsi apa, la fel și forma topologică a dimensiunilor suplimentare Calabi-Yau determină dacă anumite configurații fizice din cadrul teoriei corzilor vor apărea ca găuri negre sau ca particule elementare. Altfel spus, în prima fază, forma inițială Calabi-Yau (analogul, de pildă, al gheții), constatăm prezența unor găuri negre. În faza a doua, a doua formă Calabi-Yau (analogul fazei lichide a apei), aceste găuri negre au suferit o tranziție de fază – s-au „topit" – transformându-se în moduri de vibrație fundamentale ale corzii. Ruptura spațiului prin tranzițiile conice ne duce de la o fază Calabi-Yau la alta. În acest proces, vedem că găurile negre și particulele elementare, asemenea apei și gheții, sunt două fețe ale aceleiași monede. Observăm deci că găurile negre își găsesc locul în cadrul teoriei corzilor.

Am folosit intenționat aceeași analogie cu fazele apei atât pentru aceste tranziții cu ruperea spațiului, cât și pentru trecerea de la una din cele cinci formulări ale teoriei corzilor la alta (vezi capitolul 12), pentru că ele sunt adânc legate. Să ne amintim că figura 12.11 exprima faptul că între cele cinci teorii există relații de dualitate și de aceea sunt unificate sub cupola unei singure teorii atotcuprinzătoare. Dar oare capacitatea de a trece continuu de la o descriere la alta – de a porni din orice punct al hărții din figura 12.11 și a ajunge în oricare altul – persistă și după ce permitem dimensiunilor suplimentare să se încolăcească într-o formă Calabi-Yau sau în alta? Înainte de descoperirea rezultatelor legate de schimbarea radicală de topologie, răspunsul anticipat era nu, fiindcă nu se cunoștea nici un mijloc de a deforma continuu o formă Calabi-Yau pentru a obține o alta. Dar acum se vede că răspunsul este da: prin aceste tranziții conice cu ruperea

spațiului care au sens fizic, putem transforma continuu orice spațiu Calabi-Yau pentru a obține un altul. Variind constantele de cuplaj și geometria Calabi-Yau, se observă că toate construcțiile corzilor sunt, din nou, faze diferite ale aceleiași teorii. Chiar și după încolăcirea tuturor dimensiunilor suplimentare, unitatea figurii 12.11 se păstrează nealterată.

Entropia găurii negre

De mulți ani, unii dintre cei mai valoroși fizicieni teoreticieni au emis ipoteze privind posibilitatea procesului de rupere a spațiului și existența unei legături între găurile negre și particulele elementare. Deși la început, aceste speculații păreau științifico-fantastice, descoperirea teoriei corzilor, cu capacitatea ei de a împleti teoria relativității generale cu mecanica cuantică, ne-a permis să plasăm aceste posibilități în avangarda științei. Acest succes ne îndeamnă să ne întrebăm dacă și alte proprietăți misterioase ale universului care au refuzat decenii de-a rândul să se lase dezvăluite ar putea fi lămurite prin teoria corzilor. Una dintre cele mai importante este *entropia găurii negre*. Aceasta este arena în care teoria corzilor și-a arătat forța, rezolvând o problemă cu semnificații profunde, veche de un sfert de secol.

Entropia este o măsură a dezordinii și a caracterului întâmplător. De exemplu, dacă biroul tău e acoperit până în tavan de straturi succesive de cărți deschise, articole pe jumătate citite, ziare vechi, corespondență nefolositoare, atunci el este într-o stare de mare dezordine sau de *entropie înaltă*. Pe de altă parte, dacă este bine organizat, cu articolele îndosariate în ordine alfabetică, ziarele stivuite cu grijă în ordine cronologică, cărțile aranjate în ordine alfabetică după autor, pixurile așezate în suporturi, atunci biroul va fi într-o ordine înaltă sau de *entropie joasă*. Acest exemplu ilustrează ideea de bază, însă fizicienii au dat o definiție cantitativă entropiei, care permite descrierea entropiei unui lucru folosind o valoare numerică precisă: numerele mari reprezintă entropie mai mare, iar numere mici, entropie mai mică. Cu toate că detaliile sunt puțin mai complicate, acest număr reprezintă, în mare, posibilele rearanjări ale componentelor unui sistem fizic dat care lasă neschimbată imaginea de ansamblu. Când biroul tău este

ordonat și curat, aproape orice rearanjare – schimbarea ordinii ziarelor, cărților sau articolelor, mutarea pixurilor – va strica această organizare ordonată. Aceasta e semnificația entropiei joase. Dimpotrivă, când pe birou este o dezordine cumplită, diversele aranjamente ale ziarelor, articolelor și corespondenței nu vor schimba dezordinea, iar imaginea de ansamblu va fi aceeași. Aceasta e semnificația entropiei înalte.

Bineînțeles că rearanjarea cărților, articolelor și ziarelor pe un birou – și stabilirea acelor rearanjări care „lasă intactă imaginea de ansamblu" – nu are precizie științifică. Definiția riguroasă a entropiei implică de fapt calcularea numărului de rearanjări posibile ale proprietăților cuantice microscopice ale constituenților elementari ai unui sistem fizic care nu afectează proprietățile lui macroscopice globale (de pildă, energia sau presiunea). Detaliile nu sunt esențiale atât timp cât înțelegem că entropia este un concept cuantic cantitativ care măsoară cu precizie dezordinea de ansamblu a unui sistem fizic.

În 1970, Jacob Bekenstein, pe atunci student al lui John Wheeler la Princeton, a făcut o propunere îndrăzneață. S-a gândit că găurile negre ar putea avea entropie, și încă foarte multă. Bekenstein a pornit de la venerabila și îndelung testata *lege a doua a termodinamicii* care afirmă că entropia unui sistem crește mereu: totul tinde spre o dezordine mai mare. Chiar dacă îți vei ordona biroul, entropia totală, inclusiv cea a corpului tău și a aerului din cameră, va crește de fapt. Ca să faci ordine pe birou, cheltuiești energie, deci va trebui să rupi o parte din moleculele de grăsime aranjate în corpul tău pentru a produce această energie necesară mușchilor și, în timpul activității de ordonare, corpul eliberează căldură, așa încât moleculele de aer din jur se află într-o stare mai înaltă de agitație și dezordine. Când se ține seama de toate aceste efecte, ele vor compensa cu asupra de măsură scăderea entropiei de pe birou, iar astfel entropia totală va crește de fapt.

Dar ce se întâmplă, s-a întrebat Bekenstein, dacă îți ordonezi biroul lângă orizontul evenimentelor unei găuri negre și pornești o pompă de vid care să aspire toate moleculele de aer din cameră aflate într-o mișcare dezordonată, trimițându-le spre adâncimile ascunse din interiorul găurii negre? Putem merge și mai departe. Ce se întâmplă dacă aspiratorul pompează tot aerul, tot ce era pe birou și chiar biroul spre interiorul găurii negre, lăsându-ne într-o cameră perfect ordonată, rece, fără aer? Cum entropia din cameră a scăzut în mod cert, Bekenstein s-a gândit că singura cale de a satisface legea a doua a termodinamicii

ar fi ca gaura neagră să aibă entropie, iar această entropie să crească suficient de mult, pe măsură ce materia e pompată în gaură, pentru a contrabalansa scăderea de entropie observată în exteriorul găurii negre.

De fapt, Bekenstein s-a folosit de un celebru rezultat obţinut de Stephen Hawking. Hawking a arătat că aria orizontului evenimentelor unei găuri negre – suprafaţa dincolo de care nimic nu se mai poate întoarce – creşte mereu în orice interacţie fizică. Hawking a demonstrat că dacă un asteroid cade într-o gaură neagră, dacă o parte din gazele de la suprafaţa unei stele apropiate ajung într-o gaură negră sau dacă două găuri negre se ciocnesc şi se combină – în toate aceste procese şi în oricare altul aria totală a orizontului evenimentelor unei găuri negre creşte întotdeauna. Această evoluţie inexorabilă spre o arie totală mai mare i-a sugerat lui Bekenstein o posibilă legătură cu evoluţia inexorabilă a entropiei spre o valoare totală mai mare, aşa cum stabileşte legea a doua a termodinamicii. El a emis ipoteza că aria orizontului evenimentelor unei găuri negre oferă o măsură precisă a entropiei sale.

La o examinare mai atentă, au apărut însă două motive pentru care majoritatea fizicienilor au crezut că ideea lui Bekenstein nu putea fi corectă. În primul rând, găurile negre par să fie printre cele mai ordonate şi mai organizate obiecte din univers. Odată ce am măsurat masa, sarcinile de forţă şi spinul ei, identitatea găurii negre ar fi complet determinată. Cu atât de puţine caracteristici definitorii, unei găuri negre pare să-i lipsească o structură suficient de complexă ca să-i permită dezordinea. La fel cum nu se prea poate face dezordine pe un birou pe care se află doar o carte şi un caiet, găurile negre par prea simple pentru a suporta dezordinea. Al doilea motiv pentru care propunerea lui Bekenstein a fost greu de acceptat este că entropia e un concept cuantic, în timp ce găurile negre, până de curând, făceau parte din tabăra opusă a clasicei teorii generale a relativităţii. Cum la începutul anilor 1970 nu exista nici o modalitate de a împleti teoria generală a relativităţii cu mecanica cuantică, să vorbeşti despre o posibilă entropie a găurilor negre părea cel puţin ciudat.

Cât de negru înseamnă negru?

Hawking se gândise şi el la analogia dintre legea de creştere a suprafeţei găurii negre şi legea creşterii inevitabile a entropiei, dar i s-a

părut că e o simplă coincidență. Hawking a susținut că, bazându-se pe legea de creștere a suprafeței găurii negre și pe alte rezultate obținute împreună cu James Bardeen și Brandon Carter, dacă am lua în serios analogia dintre legile găurilor negre și legile termodinamicii, am fi obligați nu numai să identificăm aria orizontului evenimentelor găuri negre cu entropia, dar și să atribuim găurii negre o *temperatură* (valoarea precisă a temperaturii fiind determinată de intensitatea câmpului gravitațional la orizontul evenimentelor). Dar dacă o gaură neagră ar avea o temperatură diferită de zero, oricât de mică, principiile fundamentale, bine stabilite, ale fizicii ar cere ca gaura să emită radiație, ca un vătrai înroșit în foc. Însă, după cum știe toată lumea, găurile negre sunt negre; se presupune că ele nu emit nimic. Hawking și aproape toți ceilalți au respins propunerea lui Bekenstein. În schimb, Hawking era de acord cu ideea că dacă materia purtătoare de entropie ar fi aruncată într-o gaură neagră, această entropie pur și simplu s-ar pierde.

Așa stăteau lucrurile până în 1974, când Hawking a descoperit ceva cu adevărat surprinzător. El a afirmat că găurile negre nu sunt complet negre. Dacă ignorăm legile mecanicii cuantice și luăm în considerare doar legile clasice ale teoriei generale a relativității, atunci, după cum se demonstrase în urmă cu șaizeci de ani, găurile negre nu permit nici unui lucru, nici măcar luminii, să evadeze din câmpul lor gravitațional. Includerea mecanicii cuantice modifică însă această concluzie. Deși nu dispunea de o versiune cuantică a teoriei generale a relativității, Hawking a putut stabili o legătură parțială între aceste două instrumente teorerice care ofereau rezultate limitate, dar demne de încredere. Cel mai important rezultat pe care l-a găsit a fost că, din perspectiva mecanicii cuantice, găurile negre *emit* radiații.

Calculele sunt lungi și complicate, însă ideea de bază a lui Hawking e simplă. Am văzut că, în conformitate cu principiul de incertitudine, până și în vidul din spațiul gol există o agitație frenetică de particule virtuale care apar și se anihilează reciproc imediat. Acest comportament cuantic agitat apare și în regiunea din imediata vecinătate a orizontului evenimentelor unei găuri negre. Hawking a înțeles însă că puterea gravitațională a găurii negre poate injecta energie de pildă unei perechi de fotoni virtuali care se îndepărtează suficient unul de altul așa încât unul din ei să fie aspirat în gaură. Cum partenerul său a dispărut în abisul găurii, celălalt foton nu mai are un partener cu care să se anihileze. Hawking a arătat că fotonul rămas primește o infuzie

de energie din partea forței gravitaționale a găurii negre și, când partenerul său cade în interior, el este expulzat în afară, departe de gaura neagră. Hawking a înțeles că pentru cineva care privește de la distanță gaura neagră efectul combinat al despărțirii fotonilor virtuali care se produce neîncetat de-a lungul orizontului găurii negre poate apărea ca un flux continuu de radiație. Găurile negre *radiază.*

În plus, Hawking a reușit să calculeze temperatura pe care un observator aflat la distanță ar asocia-o cu radiația emisă și a găsit că ea este dată de intensitatea câmpului gravitațional la orizontul găurii negre, exact așa cum sugera analogia dintre legile fizice ale găurii negre și legile termodinamicii.[115] Bekenstein avea dreptate: rezultatele lui Hawking demonstrau că analogia ar trebui luată în serios. De fapt, aceste rezultate arătau că este mai mult decât o analogie – este o *identitate.* O gaură neagră are entropie. O gaură neagră are temperatură. Iar legile gravitaționale ale găurii negre nu sunt decât o reformulare a legilor termodinamicii într-un context gravitațional cât se poate de exotic. Aceasta a fost grenada aruncată de Hawking în 1974.

Pentru a avea și o idee asupra valorilor cantitative implicate, dacă se iau în considerare toate detaliile, o gaură neagră a cărei masă este cam de trei ori cea a Soarelui are o temperatură de aproximativ o sutime de milionime de grad peste zero absolut. Nu e zero, dar e pe aproape. Găurile negre nu sunt negre, ci doar aproape negre. Din păcate, toate acestea fac ca radiația unei găuri negre să fie anemică și imposibil de detectat experimental. Există totuși o excepție. Calculele lui Hawking au arătat că, cu cât o gaură neagră este mai puțin masivă, cu atât temperatura ei e mai mare, iar radiația pe care o emite, mai intensă. De exemplu, o gaură neagră având masa unui mic asteroid ar emite la fel de multă radiație ca o bombă cu hidrogen de un milion de megatone, radiația ei fiind concentrată în spectrul electromagnetic al razelor gama. Astronomii au cercetat cerul nopții în căutarea unei asemenea radiații, dar cu excepția unor posibilități destul de îndepărtate nu au găsit nimic, ceea ce ar putea indica faptul că, dacă asemenea găuri negre cu masă mică există, ele sunt foarte rare.[116] Păcat, fiindcă, așa cum spune Hawking destul de des în glumă, dacă această radiație prezisă de el ar fi detectată, ar primi premiul Nobel.[117]

În contrast cu valoarea minusculă a temperaturii de mai puțin de o milionime de grad, când se calculează entropia unei găuri negre cu masa de trei ori mai mare decât cea a Soarelui, rezultatul este un

număr enorm: un unu urmat de 78 de zerouri! Şi cu cât gaura neagră e mai masivă, cu atât entropia e mai mare. Succesul calculelor lui Hawking stabileşte fără echivoc că acest lucru reflectă într-adevăr enorma cantitate de dezordine înmagazinată într-o gaură neagră.

Dar ce este în dezordine acolo? După cum am văzut, găurile negre par obiecte teribil de simple, prin urmare, care e sursa acestei dezordini copleşitoare? La această întrebare calculele lui Hawking nu ne dau nici un răspuns. Fuziunea parţială realizată de el între teoria generală a relativităţii şi mecanica cuantică putea fi folosită pentru a găsi valoarea numerică a entropiei unei găuri negre, dar nu oferea informaţii despre semnificaţia ei microscopică. Timp de aproape un sfert de secol fizicienii au încercat să înţeleagă ce proprietăţi microscopice ale găurii negre puteau fi responsabile pentru entropia ei. Dar fără o împletire perfectă şi totală între teoria generală a relativităţii şi mecanica cuantică, răspunsul putea fi doar întrezărit, iar enigma rămânea nedezlegată.

Teoria corzilor îşi face intrarea

Şi a rămas nedezlegată până în ianuarie 1996, când Strominger şi Vafa, pornind de la ideile lui Susskind şi Sen, au publicat în arhiva electronică un articol intitulat „Originea microscopică a entropiei Bekenstein-Hawking". În această lucrare, Strominger şi Vafa au folosit teoria corzilor pentru a identifica constituenţii microscopici ai unei anume clase de găuri negre şi a pentru a calcula precis entropia asociată lor. Articolul lor se baza pe noua modalitate de a ocoli parţial aproximaţiile perturbative folosite de-a lungul anilor '80 şi începutul anilor '90, iar rezultatul lor confirma ceea ce preziseseră Bekenstein şi Hawking, reuşind astfel să completeze o imagine schiţată cu mai bine de două decenii în urmă.

Strominger şi Vafa s-au concentrat asupra aşa-numitelor găuri negre *extreme*. Acestea sunt găuri negre saturate de sarcini – de pildă, sarcini electrice – şi au masa minimă posibilă admisă de sarcina lor. După cum reiese din această definiţie, ele sunt strâns înrudite cu stările BPS despre care am vorbit în capitolul 12. De fapt, Strominger şi Vafa au exploatat această similitudine la maximum. Ei au arătat că pot construi, teoretic bineînţeles, anumite găuri negre extreme pornind

de la o mulţime particulară de brane BPS (cu dimensiuni bine precizate) şi legându-le împreună după un model matematic precis. Cam în acelaşi mod în care se poate construi un atom, din nou teoretic, pornind de la o grămadă de cuarci şi electroni şi aranjându-i cu precizie sub formă de protoni şi neutroni în jurul cărora se rotesc electronii, Strominger şi Vafa au arătat cum unii dintre nou-descoperiţii ingredienţi ai teoriei corzilor pot fi modelaţi pentru a crea anumite găuri negre.

Găurile negre sunt unele dintre posibilele produse finale ale evoluţiei stelare. După ce o stea şi-a consumat tot combustibilul nuclear prin fuziune atomică de-a lungul a miliarde de ani, ea nu mai are puterea – presiunea orientată spre exterior – de a rezista enormei forţe gravitaţionale îndreptate spre interior. Dacă anumite condiţii sunt îndeplinite, are loc implozia catastrofală a enormei mase a stelei; ea colapsează violent sub propria-i greutate, formând o gaură neagră. Contrar acestei căi realiste de formare, Strominger şi Vafa au încercat să „proiecteze" găuri negre. Ei au inversat procesul de formare al găurilor negre arătând cum puteau fi construite sistematic, în imaginaţia unui teoretician, ţesând cu atenţie, încet şi meticulos, o combinaţie precisă de brane apărute odată cu cea de-a doua revoluţie a supercorzilor.

Importanţa acestei abordări a devenit imediat limpede. Menţinând întregul control teoretic asupra construcţiei microscopice a găurii negre, Strominger şi Vafa au putut calcula, direct şi uşor, numărul de rearanjamente ale constituenţilor microscopici ai găurii negre care lăsau neschimbate proprietăţile de ansamblu observabile (masa şi sarcinile de forţă) ale găurii negre. Apoi, ei au comparat acest număr cu aria orizontului găurii negre – entropia prezisă de Bekenstein şi Hawking. Acordul a fost perfect. Astfel, cel puţin pentru clasa găurilor negre extreme, ei au reuşit să folosească teoria corzilor pentru a explica în mod precis constituenţii microscopici şi entropia asociată lor. Fusese în sfârşit dezlegat un mister vechi de un sfert de secol.[118]

Mulţi teoreticieni ai corzilor au considerat acest succes o dovadă importantă şi convingătoare în sprijinul teoriei. Nivelul nostru de înţelegere a teoriei corzilor nu ne permite un contact direct şi precis cu observaţiile experimentale, cum ar fi, de pildă, masa unui cuarc sau a unui electron. Dar teoria corzilor a oferit prima explicaţie fundamentală a unei proprietăţi demult stabilite a găurilor negre, care i-a deconcertat pe fizicienii ce foloseau teoriile convenţionale. Această proprietate a găurilor negre este strâns legată de ceea ce prevăzuse

Hawking, şi anume că ele ar trebui să radieze, predicţie care, în principiu, ar trebui să fie testabilă experimental. Bineînţeles că asta presupune identificarea unei găuri negre pe cer, iar apoi construcţia unui echipament suficient de sensibil pentru a detecta radiaţia emisă. Dacă găurile negre ar fi suficient de uşoare, ultimul pas ar fi accesibil tehnologiei actuale. Chiar dacă acest program experimental nu a condus deocamdată la nici un succes, el subliniază din nou faptul că prăpastia dintre teoria corzilor şi afirmaţiile fizice precise despre lumea înconjurătoare poate fi trecută. Chiar şi Sheldon Glashow, rivalul de temut al teoriei corzilor din anii '80, a declarat recent că „atunci când teoreticienii corzilor vorbesc despre găurile negre, aproape că vorbesc despre fenomene observabile, iar asta e impresionant".[119]

Misterele nedezlegate ale găurilor negre

În ciuda acestor progrese impresionante, există încă două mistere esenţiale care învăluie găurile negre. Primul se referă la impactul pe care găurile negre îl au asupra conceptului de determinism. La începutul secolului XIX, matematicianul francez Pierre-Simon de Laplace a enunţat consecinţa cea mai strictă şi cu bătaia cea mai lungă a universului-ceasornic ce rezultă din legile mişcării enunţate de Newton:

> O inteligenţă care, la un moment dat, ar putea înţelege toate forţele care animă natura şi situaţia entităţilor care o alcătuiesc, dacă în plus ar fi şi suficient de vastă pentru a analiza aceste date, atunci ar cuprinde în aceeaşi formulă mişcările celor mai mari corpuri ale universului şi ai celor mai uşori atomi. Pentru o asemenea inteligenţă nimic nu ar fi incert, iar viitorul, ca şi trecutul, s-ar deschide în faţa ochilor săi.[120]

Cu alte cuvinte, dacă la un anumit moment cunoaştem poziţia şi viteza fiecărei particule din univers, putem folosi legile de mişcare ale lui Newton pentru a determina – cel puţin în principiu – poziţia şi viteza lor în orice moment anterior sau ulterior. Din această perspectivă, toate şi oricare dintre evenimente, de la formarea Soarelui la răstignirea lui Isus şi la mişcarea ochilor voştri pentru a privi această lume, toate decurg în mod strict din poziţiile şi vitezele anumitor

ingredienți ai universului apăruți imediat după big bang. Această perspectivă rigidă asupra evoluției universului ridică tot felul de dileme filozofice legate de liberul arbitru, dar descoperirea mecanicii cuantice a făcut ca semnificația lor să pălească. Am văzut că principiul de incertitudine al lui Heisenberg subminează determinismul laplacean pentru că, în chip fundamental, nu putem cunoaște pozițiile și vitezele precise ale constituenților universului. Aceste proprietăți clasice sunt înlocuite de funcția cuantică de undă, care ne dă doar probabilitatea ca o particulă să aibă o anumită poziție şi o anumită viteză.

Prăbuşirea viziunii laplaceene nu distruge însă total conceptul de determinism. Funcțiile de undă – undele de probabilitate ale mecanicii cuantice – evoluează în timp conform unor reguli matematice precise, cum ar fi ecuația lui Schrödinger (sau corespondenții ei relativişti mai exacți, cum ar fi ecuația lui Dirac şi ecuația Klein-Gordon). Aceasta înseamnă că *determinismul cuantic* a înlocuit determinismul clasic laplacean. Informațiile asupra funcțiilor de undă ale tuturor ingredienților fundamentali ai universului la un anumit moment de timp permite o cunoaştere „suficient de vastă" pentru a determina funcțiile de undă în orice moment trecut sau viitor. Determinismul cuantic ne spune că *probabilitatea* ca un eveniment anume să aibă loc la un anumit moment din viitor este complet *determinată* prin cunoaşterea funcției de undă la orice moment anterior. Aspectul probabilistic al mecanicii cuantice atenuează semnificativ determinismul laplacean prin trecerea de la caracterul inevitabil la probabilități, dar acestea din urmă sunt complet determinate în cadrul convențional al teoriei cuantice.

În 1976, Hawking a afirmat că până şi această formă atenuată a determinismului e violată de prezența găurilor negre. Din nou, calculele din spatele acestei afirmații sunt foarte complicate, dar ideea de bază e destul de simplă. Când ceva cade într-o gaură neagră, şi funcția sa de undă e absorbită în interior. Dar asta înseamnă că, în încercarea noastră de a calcula funcțiile de undă pentru orice moment de timp din viitor, cunoaşterea noastră „suficient de vastă" va fi iremediabil înşelată. Pentru a prezice complet viitorul, trebuie să cunoaştem complet toate funcțiile de undă din prezent. Dar dacă unele din ele s-au pierdut în abisul găurilor negre, informația pe care o conțineau s-a pierdut odată cu ele.

La prima vedere, această complicație datorată găurilor negre nu are de ce să ne îngrijoreze. Cum orice lucru care trece dincolo de orizontul evenimentelor unei găuri negre este complet izolat de restul

universului, n-am putea oare să ignorăm complet tot ce a avut ghinionul să cadă acolo? Din punct de vedere filozofic ne putem oare spune că universul nu a pierdut de fapt informația pe care o purta acel lucru căzut în gaura neagră, ci ea este pur și simplu închisă într-o regiune a spațiului pe care noi, ca ființe raționale, alegem s-o evităm cu orice preț? Înainte de afirmația lui Hawking că găurile negre nu sunt complet negre, răspunsul ar fi fost afirmativ. Dar, odată ce Hawking ne-a spus că găurile negre radiază, povestea s-a schimbat. Radiația este purtătoare de energie și, odată ce gaura neagră radiază, masa ei scade încet – se evaporă încet. Când acest fenomen se produce, distanța de la centrul găurii negre la orizontul evenimentelor scade și, odată cu ea, vălul ce acoperea gaura neagră se restrânge, iar regiuni ale spațiului care fuseseră inaccesibile anterior reintră în arena cosmică. Acum va trebui să comparăm intuițiile noastre filozofice cu rezultatul: oare informația conținută în obiectele înghițite de gaura neagră, sau cel puțin informația care ne imaginăm că există în gaura neagră, reapare odată cu evaporarea găurii negre? Aceasta este informația cerută de determinismul cuantic, deci întrebarea atinge problema esențială: oare găurile negre îmbogățesc evoluția universului nostru cu un element, și mai profund, de aleator?

Deocamdată nu există un consens printre fizicieni. Mulți ani, Hawking a susținut că informația nu mai reapare – găurile negre distrug informația „introducând astfel un nou nivel de incertitudine în fizică dincolo de nivelul obișnuit de incertitudine asociat teoriei cuantice."[121] De fapt, Hawking și Kip Thorne, de la Institutul Tehnologic din California, au făcut un pariu cu John Preskill, de la același institut, legat de ce se întâmplă cu informația prinsă în gaura neagră: Hawking și Thorne au pariat că informația se pierde pentru totdeauna, în timp ce Preskill a adoptat poziția opusă, susținând că ea reapare odată ce gaura neagră radiază și se micșorează. Miza? Era vorba tot despre informație: cel care pierdea urma să ofere câștigătorului o enciclopedie la alegerea sa.*

Pariul nu a fost tranșat, însă Hawking a anunțat de curând că noile informații furnizate de teoria corzilor, prezentate anterior, demonstrează că ar putea exista o cale ca informația să reapară.[122] Noua idee

---

* În 2004, la un an după publicarea prezentei ediții a acestei cărți, Hawking a recunoscut că a pierdut pariul și i-a dăruit lui Preskill o enciclopedie a *baseball*-ului. (*N. red.*)

este că, pentru tipul de găuri negre studiate de Strominger și Vafa și apoi de mulți alții, informația poate fi stocată și recuperată din branele constituente. Strominger a afirmat recent că această descoperire „i-a făcut pe mulți teoreticieni ai corzilor să pretindă că pariul a fost tranșant: informația e recuperată odată cu evaporarea găurii negre. După părerea mea, concluzia e prematură; mai sunt multe de făcut până să putem stabili că acest lucru e adevărat“[123]. Vafa a fost de acord spunând că nu are „un răspuns la această întrebare, balanța se poate înclina în ambele părți“[124]. Răspunsul la această întrebare este obiectivul principal al cercetărilor actuale. După cum spunea Hawking:

> Majoritatea fizicienilor vor să creadă că informația nu se pierde, pentru că acest lucru ar face lumea mai sigură și mai previzibilă. Dar eu cred că, dacă luăm în serios teoria relativității generale a lui Einstein, trebuie să admitem și posibilitatea ca spațiul-timp să se înnoade, iar informația să se piardă printre cute. A determina dacă informația se pierde este una dintre problemele majore ale fizicii teoretice de azi.[125]

Al doilea mister nedezlegat al găurilor negre se referă la natura spațiului și timpului în punctul central al găurii negre.[126] O consecință directă a teoriei generale a relativității, descoperită de Schwarzschild în 1916, ne arată că masa și energia enorme din centrul găurii negre fac ca textura spațiului și timpului să fie sfâșiată, să se afle într-o stare de curbură infinită – să fie străpunsă de o singularitate spațială. Fizicienii au tras concluzia că, din moment ce toată materia care a trecut linia orizontului evenimentelor este atrasă inexorabil spre centrul găurii și odată ajunsă acolo ea nu mai poate fi recuperată, atunci însuși timpul sfârșește în centrul găurii negre. Alți fizicieni, care în cursul anilor au explorat proprietățile centrului găurii negre folosindu-se de ecuațiile lui Einstein, au sugerat că aici s-ar putea afla o cale spre un alt univers care se atașază de al nostru doar în centrul găurii negre. În linii mari, s-ar putea spune că acolo unde timpul din universul nostru se sfârșește începe timpul din universul atașat.

În capitolul următor vom cerceta unele dintre aceste posibilități uimitoare, dar acum e momentul să subliniem un aspect important. Trebuie să reținem concluzia esențială: masele enorme și dimensiunile foarte mici duc la densități inimaginabil de mari, ceea ce face imposibil

de folosit doar teoria clasică a lui Einstein și necesită introducerea mecanicii cuantice. Asta ne face să ne întrebăm ce are de spus teoria corzilor despre singularitatea spațiului și timpului din centrul găurilor negre. Acest subiect este intens cercetat actualmente, dar, ca și în cazul întrebării privind pierderea de informație, nu i s-a găsit încă un răspuns. Teoria corzilor se ocupă cu diverse alte singularități – rupturile și sfâșierile spațiului despre care am vorbit în capitolul 11 și în prima parte a acestul capitol.[127] Dacă ai văzut o singularitate, asta *nu* înseamnă că le-ai văzut pe toate. Textura universului nostru poate fi sfâșiată, ruptă și străpunsă în diferite moduri. Teoria corzilor ne-a oferit indicii despre unele singularități, dar altele, printre care și singularitatea găurilor negre, nu au putut fi până acum cercetate de teoreticienii corzilor. Din nou, motivul esențial este utilizarea metodelor perturbative în teoria corzilor, iar aceste aproximații ne împiedică să analizăm pe deplin și exact ce se întâmplă în adâncimile punctului central al unei găuri negre.

Totuși, grație marilor progrese înregistrate recent de metodele neperturbative, precum și aplicării lor cu succes la alte aspecte ale găurilor negre, teoreticienii corzilor speră ca misterul fenomenelor din centrul găurilor negre să înceapă să iasă la iveală.

CAPITOLUL 14

Reflecții asupra cosmologiei

De-a lungul istoriei, oamenii s-au străduit cu ardoare să înțeleagă originea universului. Nu există probabil nici o altă întrebare care să depășească în asemenea măsură granițele culturale și temporale, înaripând atât imaginația înaintașilor, cât și pe cea a cosmologilor moderni. La un nivel profund există o năzuință colectivă de a afla de ce există un univers, cum a ajuns la actuala formă și care sunt principiile care îi guvernează evoluția. Lucrul uimitor este că acum începe să apară acel cadru în care oamenii pot primi răspunsuri științifice la aceste întrebări.

Teoria științifică a creației acceptată în prezent afirmă că universul a cunoscut condiții extreme – energii, temperaturi și densități uriașe – la începuturile existenței sale. Aceste condiții necesită luarea în considerare și a mecanicii cuantice, și a gravitației, iar astfel nașterea universului devine o arenă vastă pentru exersarea noilor metode propuse de teoria corzilor. Vom vorbi în curând despre aceste noi idei, dar mai întâi să reamintim pe scurt scenariul cosmologic dinaintea teoriei corzilor, numit de regulă *modelul standard al cosmologiei.*

Modelul standard al cosmologiei

Teoria modernă asupra originii cosmosului a apărut la un deceniu și jumătate după ce Einstein și-a desăvârșit teoria generală a relativității. Deși Einstein a refuzat să accepte că, în conformitate cu propria lui teorie, universul nu este nici etern, nici static, Aleksandr Friedmann a făcut-o. Și, după cum am văzut în capitolul 3, Friedmann a descoperit ceea ce poartă numele de soluția big bang la ecuațiile lui Einstein –

o soluție care afirmă că universul a apărut în mod violent dintr-o stare de comprimare infinită, iar acum se află în expansiune ca urmare a acelei explozii primordiale. Einstein era atât de convins că asemenea soluții variabile în timp nu erau o consecință a teoriei sale, încât a publicat un articol în care pretindea că găsise o greșeală fatală în lucrările lui Friedmann. Totuși, opt luni mai târziu, Friedmann a reușit să-l convingă pe Einstein că nu era nici o greșeală. Einstein și-a retras obiecția în mod public, dar fără convingere. E clar că Einstein nu credea că rezultatele lui Friedmann aveau vreo relevanță pentru univers. După aproximativ cinci ani, observațiile minuțioase ale lui Hubble făcute cu un telescop de o sută de țoli la Observatorul Mount Wilson au confirmat că, într-adevăr, universul e în expansiune. Cercetările lui Friedmann, remodelate de fizicienii Howard Robertson și Artur Walker într-o formă mai sistematică și mai eficientă, constituie încă bazele cosmologiei moderne.

Teoria modernă a originilor cosmosului susține următoarele: cu aproximativ 15 miliarde de ani în urmă, universul a apărut în urma unui eveniment violent energetic care a produs tot spațiul și toată materia. (Nu trebuie să căutăm prea mult pentru a afla locul unde s-a petrecut big bang-ul – el s-a produs acolo unde suntem noi acum și pretutindeni; la început, toate pozițiile pe care acum le vedem separate erau în *același* loc.) La 10^{-43} secunde de la big bang, după așa-numitul *timp Planck*, temperatura universului, conform calculelor, era de aproximativ 10^{32} grade Kelvin, de vreo 10 milioane de miliarde de miliarde de ori mai mare decât în interiorul Soarelui. Cu trecerea timpului, universul s-a extins și s-a răcit, iar plasma cosmică primordială, inițial omogenă și fierbinte, a început să formeze vârtejuri și aglomerări. La aproximativ o sutime de miime de secundă după big bang materia se răcise suficient (până la 10 mii de miliarde de grade Kelvin, cam de un milion de ori mai fierbinte decât interiorul Soarelui), așa încât cuarcii să se unească în grupuri de trei, formând protoni și neutroni. O sutime de secundă mai târziu, condițiile erau prielnice pentru ca nucleele unora dintre cele mai ușoare elemente ale tabelului periodic să înceapă să se închege din plasma de particule. În următoarele trei minute, cum universul s-a răcit până la aproape un miliard de grade, nucleele predominante erau cele de hidrogen și heliu, cu urme de deuteriu (hidrogenul „greu") și litiu. Această perioadă este cunoscută sub numele de *nucleosinteza primordială*.

În următoarele câteva sute de mii de ani nu s-au întâmplat prea multe lucruri, în afara continuei expansiuni şi răciri. Dar apoi, când temperatura a scăzut la câteva mii de grade, mişcarea violentă a electronilor s-a domolit, iar nucleele atomice, în special hidrogenul şi heliul, au putut captura electronii, formând primii atomi neutri din punct de vedere electric. A fost un moment-cheie: de atunci universul a devenit transparent. Înainte de era capturării electronilor, universul era umplut de o plasmă densă de particule încărcate electric, unele pozitiv, ca nucleele, altele negativ, cum ar fi electronii. Fotonii, care interacţionează numai cu obiecte încărcate electric, erau izbiţi continuu de particulele încărcate, neputând traversa o distanţă cât de mică fără a se ciocni sau a fi absorbiţi. Bariera de particule încărcate care nu permitea mişcarea liberă a fotonilor făcea ca universul să pară complet opac, ceva asemănător dimineţilor cu ceaţă deasă sau furtunilor orbitoare de zăpadă. Dar, când au apărut pe orbitele din jurul nucleelor pozitive electroni încărcaţi negativ, creând atomi neutri electric, ceaţa s-a risipit. Din acel moment, fotonii proveniţi din big bang au circulat nestingheriţi, iar întreaga întindere a universului a devenit vizibilă.

După aproximativ un miliard de ani, universul se calmase mult faţă de începuturile sale frenetice, iar galaxiile, stelele şi în cele din urmă planetele au început să apară prin aglomerarea elementelor primordiale sub acţiunea gravitaţiei. Astăzi, la aproape 15 miliarde de ani de la big bang, ne putem minuna şi de măreţia cosmosului, şi de capacitatea noastră de a făuri o teorie raţională şi testabilă experimental despre originea cosmosului.

Dar cât ne putem încrede în teoria big bang-ului?

Testarea big bang-ului

Cercetând universul cu cele mai puternice telescoape, astronomii pot vedea lumina care a fost emisă de galaxii şi cuasari la doar câteva miliarde de ani după big bang. Aceasta le permite să verifice expansiunea universului prezisă de teoria big bang-ului până în fazele de început ale universului, iar potrivirea pare perfectă. Pentru a testa teoria pentru perioade mai timpurii, fizicienii şi astronomii trebuie să folo-

scască metode indirecte. Una dintre cele mai sofisticate abordări implică *radiația cosmică de fond.*

Dacă ați pus mâna pe un cauciuc de bicicletă după ce ați pompat cu putere aer în el, atunci știți că e cald. O parte din energia cheltuită prin acționarea repetată a pistonului duce la creșterea temperaturii aerului din cauciuc. Acest fenomen reflectă un principiu general: când obiectele sunt comprimate, ele se încălzesc. Invers, când obiectele se decomprimă (se destind), ele se răcesc. Aparatele de aer condiționat și frigiderele funcționează bazându-se pe aceste principii, prin supunerea substanțelor, asemenea freonului, la cicluri repetate de compresie și destindere (sau evaporare/condensare) pentru a obține transferul de căldură în direcția dorită. Deși sunt aplicații simple ale fizicii pe Pământ, acestea dezvăluie comportamentul cosmosului în întregul său.

Am văzut mai sus că, după ce electronii se alătură nucleelor pentru a forma atomi, fotonii sunt liberi să se deplaseze nestingheriți prin univers. Asta înseamnă că universul este umplut cu un „gaz" de fotoni care se deplasează în diferite direcții uniform distribuite prin cosmos. Odată cu expansiunea universului, acest gaz de fotoni care călătoresc liber se extinde și el, fiindcă universul este incinta care îl conține. Și la fel cum temperatura unui gaz mai convențional (ca aerul dintr-un cauciuc de bicicletă) scade odată cu expansiunea lui, temperatura acestui gaz de fotoni scade odată cu expansiunea universului. De fapt, încă din anii '50, fizicieni ca George Gamow și studenții lui Ralph Alpher și Robert Hermann, iar de pe la mijlocul anilor '60 Robert Dicke și Jim Peebles au înțeles că universul actual trebuie să fie îmbibat aproape uniform cu acești fotoni primordiali, care de-a lungul ultimelor 15 miliarde de ani de expansiune cosmică s-au răcit ajungând la doar câteva grade peste zero absolut.[128] În 1965, Arno Penzias și Robert Wilson de la Laboratoarele Bell din New Jersey au făcut din întâmplare una din cele mai mari descoperiri ale vremurilor noastre atunci când au detectat această urmă a big bang-ului în timp ce lucrau la construcția unei antene pentru comunicațiile prin satelit. Cercetările ulterioare au rafinat și teoria, și experimentul, culminând cu măsurătorile făcute de satelitul COBE (Cosmic Background Explorer) la începutul anilor '90. Folosind aceste date, fizicienii și astronomii au confirmat cu precizie faptul că universul *este* umplut cu microunde (dacă ochii noștri ar fi sensibili la microunde, am observa o radiație difuză în jurul nostru) corespunzând unor temperaturi de aproximativ 2,7 grade peste zero

absolut, exact aşa cum prevăzuse teoria big bang-ului. Mai concret, în *fiecare* metru cub de univers, inclusiv cel pe care-l ocupăm fiecare dintre noi în acest moment, există aproximativ 400 de milioane de fotoni ce alcătuiesc întinsul ocean cosmic de microunde care constituie un ecou al creației. Un anume procent din „punctele" care apar pe ecranul televizorului nostru când cablul de la antenă e deconectat sau când stația de televiziune și-a încetat transmisia se datorează acestei reminescențe palide a marii explozii. Concordanța între teorie și datele de observație confirmă imaginea cosmologică a marii explozii până în timpurile când fotonii se mișcau pentru prima dată liberi prin univers, cu aproximativ câteva sute de mii de ani după big bang.

Putem oare testa teoria big bang-ului și pentru perioade mai vechi? Folosind principiile standard ale teoriei nucleare și ale termodinamicii, fizicienii pot face predicții exacte asupra abundenței relative a elementelor ușoare produse în timpul perioadei de nucleosinteză primordială, care a avut loc între o sutime de secundă și câteva minute după big bang. De exemplu, conform teoriei, aproape 23% din univers ar trebui să fie compus din heliu. Măsurând abundența heliului din stele și nebuloase, astronomii au adunat dovezi concludente care susțin predicția teoretică. Și mai impresionantă este confirmarea predicției privind abundența deuteriului, pentru că nu există nici un proces astrofizic în afară de big bang care să-i explice prezența limitată, dar certă, în cosmos. Confirmarea abundenței deuteriului și, mai recent, a litiului validează înțelegerea la care am ajuns asupra fizicii universului timpuriu până în vremurile sintezei primordiale.

Succesul este remarcabil. Toate datele pe care le deținem confirmă o teorie cosmologică în stare să descrie universul încă de la o sutime de secundă după big bang și până în prezent, adică la aproape 15 miliarde de ani după big bang. Nu trebuie însă pierdut din vedere faptul că noul univers a evoluat cu o viteză fenomenală. Fracțiuni minuscule de secundă – *mult* mai mici decât o sutime de secundă – formează epocile cosmice în timpul cărora s-au imprimat trăsăturile de lungă durată ale lumii. Astfel, fizicienii și-au continuat cercetările, încercând să explice universul și mai timpuriu. Odată cu regresia în timp, universul devenind din ce în ce mai mic, mai cald și mai dens, descrierea cuantică a materiei și a forțelor e din ce în ce mai importantă. După cum am văzut în capitolele anterioare, teoria cuantică de câmp a particulelor punctiforme poate fi aplicată până când energiile parti-

culelor ajung în jurul energiei Planck. În context cosmic, aceasta s-a petrecut când întregul univers avea mărimea unui grăunte de dimensiuni Planck, cu o densitate pentru care nu există metaforă sau analogie: densitatea universului la timpul Planck era pur şi simplu *colosală*. La asemenea energii şi densităţi gravitaţia şi mecanica cuantică nu mai pot fi tratate ca două entităţi separate, aşa cum se întâmplă în teoria cuantică de câmp a particulelor punctiforme, ci va trebui să folosim teoria corzilor la şi dincolo de aceste energii uriaşe. În termeni temporali, întâlnim aceste energii şi densităţi pentru perioade mai timpurii decât timpul Planck de 10^{-43} secunde după big bang, deci această epocă este arena cosmologică a teoriei corzilor.

Să ne îndreptăm spre această eră văzând mai întâi ce ne spune teoria cosmică standard despre univers la mai puţin de o sutime de secundă de la big bang, dar după timpul Planck.

De la timpul Planck la o sutime de secundă după big bang

Să ne amintim din capitolul 7 că cele trei forţe negravitaţionale par să fuzioneze în acel mediu fierbinte al universului primordial. Calculele fizicienilor privind variaţia tăriei acestor forţe cu energia şi temperatura arată că înainte de aproximativ 10^{-35} secunde de la big bang forţele tari, slabe şi electromagnetice constituiau o singură „super" forţă unificată. În acel stadiu, universul era mult mai simetric decât este astăzi. Asemeni omogenizării care se obţine când mai multe metale diferite sunt încălzite şi topite împreună într-un aliaj, diferenţele semnificative dintre forţele pe care le observăm acum erau anulate de valorile extreme ale energiilor şi temperaturilor din universul primordial. Formalismul teoriei cuantice de câmp ne arată că, odată cu trecerea timpului şi cu răcirea şi expansiunea universului, această simetrie s-a redus brusc în câteva rânduri, având ca ultim rezultat formele relativ asimetrice pe care le cunoaştem.

Nu e greu de înţeles fizica ce stă la baza acestei reduceri de simetrie, sau *rupere de simetrie*, cum este ea numită în termeni de specialitate. Să ne imaginăm un rezervor mare umplut cu apă. Moleculele de H_2O sunt uniform distribuite în rezervor şi, indiferent de unghiul

sub care priveşti apa, ea arată la fel. Să privim acum rezervorul în timp ce scădem temperatura. La început nu se observă vreo diferenţă. La scară microscopică, viteza medie a moleculelor de apă scade, dar asta e cam tot ce se întâmplă. Când temperatura scade la 0 grade Celsius, se observă însă brusc o diferenţă radicală. Apa lichidă începe să îngheţe şi să se transforme în gheaţă. După cum am văzut în capitolul anterior, acesta e un exemplu de tranziţie de fază. Esenţial în cadrul discuţiei de faţă e faptul că tranziţia de fază duce la scăderea simetriei moleculelor de H_2O. Dacă apa lichidă arată la fel indiferent de unghiul din care o priveşti – e simetrică la rotaţii –, gheaţa solidă e diferită. Ea are o structură cristalină, ceea ce înseamnă că, dacă o examinezi cu suficientă precizie, ea va arăta diferit din unghiuri diferite. Tranziţia de fază a avut ca rezultat scăderea simetriei la rotaţii.

Deşi am adus în discuţie un singur exemplu familiar, observaţia poate fi generalizată: când scade temperatura multora dintre sistemele fizice, la un prag critic ele trec printr-o tranziţie de fază care duce la scăderea sau „ruperea" unora dintre simetriile anterioare. De fapt, un sistem poate trece printr-o serie de tranziţii de fază dacă temperatura variază într-un domeniu suficient de larg. Apa constituie din nou un exemplu simplu. Dacă începem la temperatura de 100° C, H_2O este un gaz: abur. În această stare sistemul are şi mai multă simetrie decât în faza lichidă, pentru că acum moleculele individuale de apă au fost eliberate din legătura care le menţine laolaltă în forma lichidă. Ele se agită în interiorul recipientului, fiind toate pe picior de egalitate, fără a forma aglomerări sau „bulgări" în care grupuri de molecule ies în evidenţă printr-o asociere mai strânsă, în detrimentul altora. La temperaturi suficient de înalte predomină democraţia moleculară. Odată cu scăderea temperaturii, sub 100° C, se vor forma picături de apă la tranziţia de fază gaz-lichid, deci simetria a fost redusă. Continuând scăderea temperaturii nu se vor petrece fenomene radicale până ajungem la 0° C, când, după cum am spus mai devreme, are loc tranziţia de fază apă/lichidă – gheaţă/solidă care duce la o altă scădere abruptă a simetriei.

Fizicienii consideră că între timpul Planck şi sutimea de secundă de la big bang universul s-a comportat asemănător, trecând prin cel puţin două tranziţii de fază. La temperaturi de peste 10^{28} grade Kelvin, cele trei forţe negravitaţionale apăreau ca una singură. (La sfârşitul acestui capitol vom vorbi despre includerea forţei gravitaţionale prin

teoria corzilor în această fuziune la temperaturi înalte.) Dar, odată cu scăderea temperaturii sub 10^{28} grade Kelvin, universul a trecut printr-o tranziţie de fază în care cele trei forţe au cristalizat pe căi diferite din uniunea lor. Tăriile lor relative şi detaliile acţiunii lor asupra materiei au început să se deosebească. Astfel, simetria evidentă dintre aceste forţe la temperaturi înalte a fost ruptă odată cu răcirea universului. Cercetările lui Glashow, Salam şi Weinberg (vezi capitolul 5) demonstrează însă că nu întreaga simetrie de la temperaturile înalte a fost distrusă: forţele slabe şi cele electromagnetice sunt încă strâns împletite. Odată cu răcirea şi expansiunea în continuare a universului, nu s-au produs schimbări majore până când s-a ajuns la 10^{15} grade Kelvin, cam de 100 de milioane de ori temperatura din centrul Soarelui; atunci universul a trecut printr-o altă tranziţie de fază care a afectat forţele slabe şi electromagnetice. La această temperatură, şi ele au cristalizat din uniunea anterioară, mai simetrică, iar cum universul continua să se răcească, diferenţele dintre ele au crescut. Aceste două tranziţii de fază sunt răspunzătoare pentru apariţia celor trei forţe negravitaţionale, aparent distincte, din lumea actuală, iar această scurtă incursiune în istoria cosmosului demonstrează că ele sunt de fapt profund înrudite.

O enigmă cosmologică

Această eră cosmică post-Planck oferă un cadru elegant, coerent şi accesibil calculelor pentru înţelegerea universului timpuriu. Dar, aşa cum se întâmplă cu cele mai multe teorii de succes, noile rezultate ridică şi mai multe întrebări de detaliu. Unele dintre aceste întrebări, deşi nu invalidează scenariul cosmologic standard, pun în evidenţă aspecte stranii care necesită o teorie mai profundă. Să ne oprim asupra unuia dintre ele. Se numeşte *problema orizontului* şi constituie un important subiect al cosmologiei moderne.

Studii detaliate ale radiaţiei cosmice de fond au arătat că, indiferent în ce direcţie a spaţiului îndreptăm antena, temperatura radiaţiei este aceeaşi, cu o precizie de unu la 100 000. Dacă ne gândim puţin, vedem că este destul de ciudat. De ce ar avea diferite zone din univers, separate prin distanţe enorme, temperaturi atât de bine corelate? O rezolvare oarecum naturală a acestui mister ar porni de la observaţia că

două puncte diametral opuse ale universului se află acum la mare distanță, dar, la fel ca gemenii separați la naștere, în momentele timpurii ale universului au fost (împreună cu tot restul universului) foarte apropiate. Odată ce au același punct de origine, ați putea crede că nu e deloc surprinzător că împărtășesc trăsături fizice comune cum ar fi temperatura lor.

În cosmologia standard a big bang-ului această idee e falsă. Și iată de ce. O farfurie cu supă fierbinte se răcește treptat la temperatura camerei, pentru că este în contact cu aerul înconjurător, mai rece. Dacă aștepți suficient de mult, temperatura supei și cea a aerului vor deveni, prin acest contact reciproc, identice. Însă, dacă supa se află într-un termos, acesta îi va reține căldura pentru un timp mult mai îndelungat, fiindcă există mai puțină comunicare cu mediul exterior. Acest lucru reflectă faptul că omogenizarea temperaturii dintre două corpuri se bazează pe contactul lor desăvârșit și prelungit. Pentru a testa ideea că poziții din spațiu care sunt actualmente separate de distanțe mari au aceeași temperatură datorită contactului lor inițial, va trebui să examinăm eficiența schimbului de informație dintre ele în universul timpuriu. Am putea fi tentați să ne închipuim că pozițiile mai apropiate din trecutul îndepărtat făceau comunicarea mai ușoară. Dar proximitatea spațială e doar o parte a problemei. Cealaltă parte este durata.

Să ne imaginăm că studiem „filmul“ expansiunii cosmice, însă derulat invers, din prezent spre big bang. Cum viteza luminii stabilește o limită a vitezei cu care un semnal sau o informație de orice fel poate fi transmisă, materia din două regiuni spațiale poate face schimb de căldură, deci poate ajunge la o temperatură comună, doar dacă distanța dintre regiuni la un anumit moment este mai mică decât distanța pe care lumina ar fi putut s-o parcurgă de la momentul big bang-ului. Astfel, pe măsură ce derulăm înapoi filmul, vedem că există o competiție între gradul de apropiere la care se află regiunile noastre spațiale și cât de mult trebuie să ne întoarcem în timp pentru ca ele să ajungă la această distanță. De exemplu, dacă pentru a avea o distanță de 300 000 km între cele două poziții din spațiu va trebui să derulăm filmul până la mai puțin de o secundă după big bang, atunci se observă că, în ciuda apropierii, nu există nici o șansă ca ele să se influențeze una pe alta, fiindcă lumina are nevoie de o secundă întreagă pentru a se deplasa între ele.[129] Dacă vrem ca distanța dintre ele să fie mult mai mică, de pildă 300 km, atunci trebuie să derulăm filmul până la

o miime de secundă după big bang, ceea ce ne duce la concluzia că timpul este din nou insuficient pentru ca lumina să poată parcurge cei 300 km care despart cele două poziţii. Continuând cu acelaşi gen de raţionament, dacă trebuie să derulăm filmul la mai puţin de o miliardime de secundă după marea explozie, pentru a avea distanţa dintre aceste regiuni de un metru, vom vedea că ele tot nu se pot influenţa reciproc fiindcă nu a trecut suficient timp de la big bang pentru ca lumina să fi parcurs distanţa dintre ele. Asta ne demonstrează că, dacă două obiecte devin din ce în ce mai apropiate pe măsură ce ne întoarcem în timp spre marea explozie, nu înseamnă neapărat că între ele a avut loc contactul termic – ca acela dintre supă şi aer – necesar pentru a le aduce la aceeaşi temperatură.

Fizicienii au arătat că aceasta este problema care apare în modelul big bang standard. Calculele detaliate demonstrează că pentru regiunile din spaţiu separate în prezent prin mari distanţe nu putea avea loc schimbul de căldură care să explice faptul că au acum aceeaşi temperatură. Cum cuvântul „orizont" trimite la „cât de mult putem vedea" – distanţa pe care lumina o poate parcurge – fizicienii numesc această uniformitate inexplicabilă a temperaturii de-a lungul vastului ocean cosmic „problema orizontului". Faptul că problema rămâne neexplicată nu înseamnă că teoria cosmologică standard este greşită. Uniformitatea temperaturii ne arată că pierdem din vedere o parte importantă din scenariul cosmologic. În 1979, fizicianul Alan Guth, acum la Institutul Tehnologic din Massachusetts, a reuşit să scrie capitolul care lipsea din scenariu.

Inflaţia

Problema orizontului îşi are originea în faptul că, pentru a apropia două regiuni ale universului separate de o distanţă foarte mare, trebuie să derulăm filmul cosmic mult înapoi, spre începutul timpului. Atât de departe în trecut, încât nici o influenţă fizică nu a avut suficient timp pentru a se deplasa de la o regiune la alta. Dificultatea constă în aceea că, pe măsură ce derulăm filmul cosmic înapoi şi ne apropiem de big bang, universul nu se micşorează suficient de repede.

Acesta este fondul problemei, însă merită să o cercetăm mai atent. Problema orizontului porneşte de la faptul că, la fel ca în cazul unei

mingi aruncate în sus, forţa gravitaţională face ca ritmul de expansiune a universului să fie *încetinit*. Asta înseamnă că, de exemplu, pentru a înjumătăţi distanţa care separă două poziţii din spaţiu, va trebui să derulăm filmul cu mai mult de jumătate din vârsta universului. Mai puţin timp de la big bang, proporţional vorbind, înseamnă că este *mai dificil* ca cele două regiuni să comunice, deşi ele se află mai aproape.

Rezolvarea pe care Guth a dat-o problemei orizontului este acum simplu de expus. El a găsit o altă soluţie a ecuaţiilor lui Einstein, în care universul foarte timpuriu trece printr-o scurtă perioadă de expansiune extrem de rapidă, perioadă în timpul căreia se „umflă" în dimensiuni cu o rată de expansiune *exponenţială*. Spre deosebire de cazul mingii care e încetinită după ce a fost aruncată în sus, expansiunea exponenţială devine tot mai *rapidă* cu trecerea timpului. Când derulăm filmul cosmic în sens invers, expansiunea accelerantă se transformă în contracţie accelerată. Asta înseamnă că pentru a înjumătăţi distanţa dintre două poziţii din cosmos (în epoca exponenţială), trebuie să derulăm filmul înapoi cu mai puţin de jumătate – de fapt, cu mult mai puţin. A derula mai puţin filmul înapoi implică faptul că două regiuni vor fi avut mai mult timp pentru a comunica termic şi, asemeni supei calde şi aerului, ele vor fi avut mai mult timp să ajungă la aceeaşi temperatură.

Prin descoperirea lui Guth şi contribuţiile ulterioare ale lui Andrei Linde, actualmente la Universitatea Stanford, Paul Steinhardt şi Andreas Albrecht, de la Universitatea din Pennsylvania, şi ale multor altora, modelul cosmologic standard a fost refăcut rezultând modelul cosmologic *inflaţionar*. În acest cadru, modelul cosmologic standard este modificat într-un interval – între aproximativ 10^{-36} şi 10^{-34} secunde după marea explozie – timp, în care universul s-a extins cu colosalul factor de cel puţin 10^{-30} în comparaţie cu un factor de aproximativ o sută în cursul aceluiaşi interval de timp, conform scenariului standard. Asta înseamnă că, în aproximativ o miliardime de miliardime de miliardime de miliardime de secundă de la big bang, dimensiunile universului au crescut cu un procentaj mai mare decât în cele 15 miliarde de ani scurse de atunci. Înainte de această expansiune, materia care se află acum în zone îndepărtate din cosmos era mult mai apropiată decât ne spune modelul cosmologic standard, ceea ce face cu putinţă stabilirea unei temperaturi comune. Apoi, graţie scurtei inflaţii cosmolo-

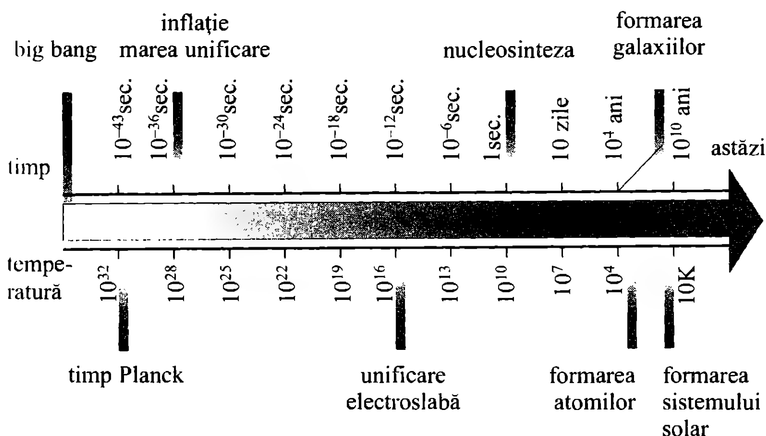


Figura 14.1 O linie a timpului pe care sunt marcate câteva momente-cheie din istoria universului.

gice – urmată de expansiunea obişnuită, conformă cu modelul cosmologic standard – aceste regiuni ale spaţiului au putut fi separate prin imensele distanţe pe care la vedem în prezent. Astfel, scurta, dar profunda modificare inflaţionară a modelului cosmologic standard rezolvă problema orizontului (precum şi alte probleme importante pe care nu le-am menţionat), fiind larg acceptată de cosmologi.[130]

Figura 14.1 rezumă istoria universului de la timpul Planck şi până în zilele noastre, în conformitate cu teoria actuală.

Cosmologia şi teoria supercorzilor

În figura 14.1 există un interval îngust, între big bang şi timpul Planck, despre care n-am discutat. Aplicând orbeşte acelei regiuni ecuaţiile teoriei generale a relativităţii, fizicienii au descoperit că universul continuă să se micşoreze, devenind tot mai fierbinte şi tot mai dens, pe măsură ce ne întoarcem în timp spre big bang. La momentul zero, când dimensiunea universului dispare, temperatura şi densitatea tind spre infinit, ceea ce reprezintă un semnal clar că acest model teoretic al universului, bazat pe gravitaţia clasică a teoriei generale a relativităţii, e inutilizabil.

Natura ne spune deci că în asemenea condiţii trebuie să contopim teoria generalizată a relativităţii cu mecanica cuantică – cu alte cuvinte, să folosim teoria corzilor. În prezent, cercetările privind implicaţiile teoriei corzilor asupra cosmologiei sunt într-un stadiu incipient. Metodele perturbative ne dau, în cel mai fericit caz, o idee vagă, pentru că valorile extreme ale energiei, temperaturii şi densităţii necesită o analiză precisă. Deşi a doua revoluţie a supercorzilor a furnizat câteva tehnici neperturbative, va trece încă destul timp până când acestea vor fi cizelate pentru a fi folosite la calcule cosmologice. Totuşi, în cursul ultimului deceniu, fizicienii au făcut deja primii paşi spre înţelegerea cosmologiei corzilor. Iată ce au descoperit.

Se pare că există trei căi esenţiale prin care teoria corzilor modifică modelul cosmologic standard. În primul rând, teoria corzilor implică, într-o manieră care mai trebuie încă lămurită, faptul că universul are o dimensiune minimă posibilă. Aceasta are consecinţe profunde asupra modului nostru de a privi universul chiar în momentul marii explozii, când teoria standard pretinde că dimensiunea lui a scăzut până la zero. În al doilea rând, teoria corzilor prezintă o dualitate rază mică/rază mare (legată direct de dimensiunea mimimă posibilă), care de asemenea are implicaţii cosmologice profunde, după cum vom vedea în curând. În fine, teoria corzilor are mai mult de patru dimensiuni spaţiale şi, din punct de vedere cosmologic, trebuie să urmărim evoluţia tuturor dimensiunilor. Să discutăm acum detaliat aceste trei aspecte.

La început a fost un grăunte de dimensiuni Planck

Pe la sfârşitul anilor 1980, Robert Brandenberger şi Cumrun Vafa au făcut primii paşi pentru a înţelege cum modifică teoria corzilor concluziile modelului cosmologic standard. Ei au ajuns la două descoperiri importante. Mai întâi, când ne întoarcem în timp către începuturi, temperatura continuă să crească până ce dimensiunea universului atinge aproximativ lungimea Planck în toate direcţiile. Atunci însă, temperatura ajunge la un *maximum* şi începe să *scadă*. Motivul nu e greu de înţeles. Pentru simplitate să ne închipuim (aşa cum au făcut Brandenberger şi Vafa) că toate dimensiunile spaţiale ale universului sunt circulare. Când dăm ceasul înapoi în timp, raza fiecăreia dintre aceste

dimensiuni scade, iar temperatura universului creşte. Dar, când fiecare rază scade sub lungimea Planck, teoria corzilor ne spune că, din punct de vedere fizic, situaţia e identică cu cea în care, după ce scad până la lungimea Planck, razele încep să crească. Cum temperatura scade pe măsură ce universul se extinde, ne-am aştepta ca încercările inutile de a restrânge universul sub lungimea Planck să ducă la creşterea temperaturii, după ce aceasta va fi atins o valoare maximă. Prin calcule amănunţite, Brandenberger şi Vafa au verificat explicit că într-adevăr aşa stau lucrurile.

Asta i-a condus pe Brandenberger şi pe Vafa la următoarea imagine cosmologică. La început, toate dimensiunile spaţiale ale teoriei corzilor erau strâns încolăcite până la cea mai mică valoare posibilă, care este aproximativ lungimea Planck. Temperatura şi energia sunt mari, dar nu infinite, căci teoria corzilor a evitat aceste dificultăţi provocate de punctul iniţial de dimensiune zero, infinit comprimat. În acest moment de început al universului, toate dimensiunile spaţiale ale teoriei corzilor sunt pe picior de egalitate – sunt perfect simetrice – strânse într-un grăunte multidimensional la scara Planck. Apoi, conform lui Brandenberger şi Vafa, universul cunoaşte prima etapă de reducere a simetriei, când, la aproximativ timpul Planck, trei dintre dimensiunile spaţiale încep să se extindă, iar toate celelalte rămân la scara Planck. Aceste trei dimensiuni spaţiale sunt identificate cu cele din scenariul cosmologic inflaţionar, evoluţia de după timpul Planck rezumată în figura 14.1 intră în acţiune, iar aceste trei dimensiuni se extind până la forma lor observabilă în prezent.

De ce trei?

Ne vine imediat în minte următoarea întrebare: ce determină ca reducerea de simetrie să pună în evidenţă exact trei dimensiuni spaţiale pentru expansiune? Adică, dincolo de faptul experimental testabil că doar trei dintre dimensiunile spaţiale s-au extins la o mărime observabilă, poate oare teoria corzilor furniza un motiv fundamental pentru care nu s-au extins dimensiunile spaţiale într-un număr diferit (patru, cinci, şase, şi aşa mai departe) sau, şi mai simetric, toate? Brandenberger şi Vafa au găsit o explicaţie posibilă. Să ne amintim că dualitatea

rază mică/rază mare se bazează pe faptul că, atunci când o dimensiune e încolăcită în formă de cerc, o coardă se poate înfăşura în jurul ei. Brandenberger şi Vafa au înțeles că, la fel ca benzile elastice înfăşurate în jurul unei camere de bicicletă, asemenea corzi înfăşurate tind să strângă dimensiunile pe care le înconjoară, împiedicând extinderea lor. La prima vedere asta ar însemna că toate dimensiunile ar fi încolăcite, din moment ce corzile se înfăşoară în jurul tuturor dimensiunilor. Dar, dacă o coardă înfăşurată şi partenerul ei anticoardă (în mare, e vorba despre o coardă care înfăşoară dimensiunea în direcție opusă) intră în contact, ele se vor anihila imediat una pe alta, rezultând o coardă *neînfăşurată*. Dacă asemenea procese se petrec cu suficientă rapiditate şi eficiență, o parte din strângerea tip bandă elastică va fi eliminată, permițând dimensiunilor să se extindă. Brandenberger şi Vafa au sugerat că această reducere a efectului de sugrumare a corzilor înfăşurate are loc doar în trei dintre dimensiunile spațiale. Iată şi motivul.

Să ne imaginăm două particule punctiforme deplasându-se de-a lungul unei linii asemănătoare întinderii spațiale a Țării Liniare. Dacă nu au viteze egale, în cele din urmă se vor ciocni. Să observăm că dacă aceleaşi două particule punctiforme se deplasează la întâmplare într-un plan bidimensional asemeni întinderii spaţiale a Țării Plate, este foarte probabil să nu se ciocnească niciodată. A doua dimensiune spațială deschide noi posibilități de traiectorii pentru fiecare particulă, iar majoritatea lor nu se intersectează între ele în acelaşi punct şi la acelaşi moment de timp. Într-un spaţiu cu trei, patru sau un număr mai mare de dimensiuni, este din ce în ce mai puţin probabil ca cele două particule punctiforme să se întâlnească vreodată. Brandenberger şi Vafa au înțeles că un raționament analog este valabil şi dacă înlocuim particulele punctiforme cu bucle de corzi înfăşurate în jurul dimensiunilor spațiale. Deşi este mult mai greu de imaginat, dacă există *trei* sau mai puține dimensiuni spațiale circulare, este probabil ca două corzi înfăşurate să se ciocnească – analogul a ceea ce se întâmplă în cazul a două particule care se mişcă într-o singură dimensiune. Dar în patru sau mai multe dimensiuni spațiale, corzile înfăşurate au probabilitate mai mică de a se ciocni vreodată – analogul situației celor două particule punctiforme într-un spațiu cu două sau mai multe dimensiuni.[131]

Aceasta conduce la următoarea imagine. În primele momente ale universului, agitația datorată temperaturii înalte, dar finite, determină

toate dimensiunile circulare să se extindă. Atunci, corzile înfăşurate în jurul lor împiedică extinderea, determinând dimensiunile să se restrângă înapoi la raza lor iniţială de lungime Planck. Însă, mai devreme sau mai târziu, o fluctuaţie termică aleatoare va face ca trei dimensiuni să crească mai mult decât celelalte şi, conform celor discutate anterior, pentru corzile care se înfăşoară în jurul acestora probabilitatea de ciocnire va fi mare. Aproximativ jumătate din ciocniri vor implica perechi coardă/anticoardă, ducând la anihilări care slăbesc continuu strângerea, ceea ce permite acestor trei dimensiuni să continue să se extindă. Cu cât se extind mai mult, cu atât devine mai puţin probabil ca alte corzi să se înfăşoare în jurul lor, căci e nevoie de mai multă energie pentru ca o coardă să se înfăşoare în jurul unei dimensiuni mai mari. Astfel, expansiunea e autoîntreţinută, devenind din ce în ce mai puţin constrânsă pe măsură ce dimensiunile cresc. Acum putem să ne imaginăm că cele trei dimensiuni spaţiale continuă să evolueze în maniera prezentată în secţiunile anterioare şi să se extindă la o scară la fel de mare sau mai mare decât cea a universului observabil în prezent.

Cosmologia şi formele Calabi-Yau

Pentru simplificare, Brandenberger şi Vafa şi-au imaginat că toate dimensiunile spaţiale sunt circulare. De fapt, aşa cum am văzut în capitolul 8, dacă dimensiunile circulare sunt suficient de mari pentru a închide cercul dincolo de capacitatea noastră actuală de observaţie, forma circulară e în acord cu universul pe care îl vedem. Pentru dimensiunile care rămân mici, mai realist e să considerăm că ele sunt încolăcite într-o formă Calabi-Yau mai complicată. Desigur, se pune întrebarea: care spaţiu Calabi-Yau? Cum poate fi determinat acest spaţiu? Nimeni nu a fost în stare să găsească răspunsul. Dar, combinând rezultatele legate de transformările topologice violente din capitolul anterior cu aceste noi idei cosmologice, am putea sugera o metodă de determinare a lui. De la tranziţiile conice cu rupere a spaţiului ştim că orice formă Calabi-Yau se poate transforma în oricare alta. Ne putem deci închipui că în momentele agitate şi fierbinţi de după marea explozie, componenta Calabi-Yau încolăcită a spaţiului rămâne

mică, însă efectuează un dans frenetic în care textura sa se rupe şi se reface de multe ori, trecând rapid printr-un lung şir de diferite forme Calabi-Yau. Odată cu răcirea universului şi cu extinderea a trei dintre dimensiunile spaţiale, ritmul tranziţiilor de la o formă Calabi-Yau la alta încetineşte, iar dimensiunile suplimentare se stabilesc finalmente într-o formă Calabi-Yau care dă naştere trăsăturilor fizice observate în lumea din jurul nostru. Dificultatea cu care se confruntă fizicienii este de a înţelege în detaliu evoluţia componentei Calabi-Yau astfel încât actuala ei formă să poată fi prezisă pornind de la principii teoretice. Proprietatea formelor Calabi-Yau de a se transforma în mod continuu unele în altele face ca alegerea unei forme Calabi-Yau dintre multe altele să se reducă la o problemă de cosmologie.[132]

Înainte de începuturi?

În lipsa ecuaţiilor exacte ale teoriei corzilor, Brandenberger şi Vafa au fost obligaţi să facă numeroase aproximaţii şi presupuneri în studiile lor cosmologice. După cum spunea Vafa de curând,

> Cercetările noastre pun în evidenţă calea pe care teoria corzilor ne permite să pornim în abordarea problemelor nerezolvate în cadrul modelului standard al cosmologiei. Se observă, de exemplu, că noţiunea de singularitate iniţială poate fi complet evitată de teoria corzilor. Dar, din cauza dificultăţilor de a efectua calcule pe care să ne putem bizui în asemenea situaţii extreme, cercetările noastre oferă doar o primă privire asupra cosmologiei corzilor şi suntem încă foarte departe de o înţelegere deplină.[133]

De la apariţia lucrării lui Brandenberger şi Vafa, fizicienii au făcut progrese constante în înţelegerea cosmologiei corzilor. Gabriele Veneziano şi colaboratorul său Maurizio Gasperini de la Universitatea din Torino au creat propria lor versiune a cosmologiei corzilor, care are anumite trăsături comune cu scenariul descris anterior, dar diferă în multe privinţe. Ca şi în lucrarea lui Brandenberger şi Vafa, ei se bazează pe lungimea minimă din teoria corzilor pentru a evita temperatura şi densitatea de energie infinite care apar în teoriile cosmologice standard şi inflaţionare. Dar în loc să tragă de aici concluzia

că universul începe ca un grăunte extrem de fierbinte de dimensiuni Planck, Gasperini şi Veneziano au sugerat că ar putea exista o întreagă *preistorie* a universului – începând cu mult înainte de ceea ce noi am numit până acum momentul zero – care conduce la embrionul cosmic Planck.

În acest aşa-numit scenariu *pre-big bang*, universul a început de la o stare complet diferită de cea presupusă în modelul big bang. Gasperini şi Veneziano au sugerat că, în loc să fi fost extrem de fierbinte şi strâns încolăcit într-o fărâmă minusculă, universul a pornit de la o întindere spaţială rece şi *infinită*. Ecuaţiile teoriei corzilor indică faptul că – oarecum asemănător epocii inflaţionare a lui Guth – a apărut o instabilitate care a făcut ca fiecare punct din univers să se îndepărteze rapid de toate celelalte. Gasperini şi Veneziano au arătat că aceasta a provocat o curbare tot mai mare a spaţiului, iar temperatura şi densitatea de energie au crescut spectaculos.[134] După un timp, o regiune tridimensională, având o întindere de ordinul milimetrilor, din *interiorul* acestei vaste expansiuni, ar fi putut arăta ca fragmentul extrem de fierbinte şi dens din expansiunea inflaţionară a lui Guth. Apoi, prin expansiunea standard a cosmologiei big bang, acest fragment poate explica întregul univers pe care îl cunoaştem. Mai mult, pentru că epoca pre-big bang implică propria sa expansiune inflaţionară, soluţia lui Guth la problema orizontului este automat inclusă în scenariul cosmologic pre-big bang. După cum spunea Veneziano, „teoria corzilor ne oferă pe o tavă de argint o versiune a cosmologiei inflaţionare".[135]

Studiul cosmologiei supercorzilor devine rapid o arenă activă şi fertilă de cercetare. De exemplu, scenariul pre-big bang a provocat deja dezbateri aprinse, dar fructuoase, şi nu se ştie ce rol va juca în cadrul cosmologic care va rezulta în cele din urmă din teoria corzilor. Noua cosmologie se va baza fără îndoială pe capacitatea fizicienilor de a înţelege toate aspectele dezvăluite de cea de-a doua revoluţie a corzilor. Care sunt, de exemplu, consecinţele cosmologice ale existenţei branelor cu mai multe dimensiuni? Cum se schimbă proprietăţile cosmice despre care am vorbit dacă constanta de cuplaj se întâmplă să aibă o valoare care să ne plaseze spre centrul figurii 12.11, şi nu într-una din regiunile peninsulare ale ei? Cu alte cuvinte, ce impact ar avea teoria M asupra celor mai timpurii momente ale universului? Aceste probleme fundamentale sunt studiate asiduu în prezent, iar o descoperire importantă a apărut deja.

Teoria M şi fuziunea tuturor forţelor

În figura 7.1 am arătat că tăriile celor trei forţe negravitaţionale tind spre o valoare comună atunci când temperatura universului creşte suficient de mult. Cum se încadrează tăria forţei gravitaţionale în acest tablou? Înainte de apariţia teoriei M, fizicienii au demonstrat că, pentru cea mai simplă alegere a componentei Calabi-Yau a spaţiului, forţa gravitaţională se uneşte aproximativ cu celelalte trei, aşa cum e ilustrat în figura 14.2. Teoreticienii corzilor au arătat că nepotrivirea ar putea fi evitată prin modelarea atentă a formei Calabi-Yau alese, dar asemenea ajustări ulterioare nu sunt pe placul fizicienilor.

Cum nimeni nu cunoaşte deocamdată forma precisă a dimensiunilor Calabi-Yau, pare riscant să ne bazăm pe soluţii ale unor probleme care depind critic de micile detalii ale formei lor.

Witten a arătat însă că a doua revoluţie a corzilor oferă o soluţie mai bună. Cercetând modul de variaţie al tăriei forţelor atunci când constanta de cuplaj nu e neapărat mică, Witten a descoperit că graficul forţei gravitaţionale poate fi uşor ajustat pentru a se uni cu celelalte forţe, ca în figura 14.2, fără o modelare specială a porţiunii Calabi-Yau a spaţiului. Deşi e prea devreme pentru a ne pronunţa, aceasta ar putea indica faptul că unitatea cosmologică este mai uşor de obţinut făcând apel la cadrul extins al teoriei M.

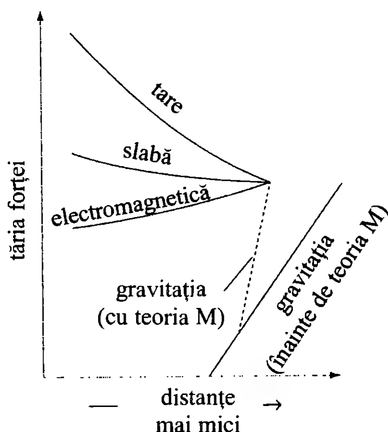


Figura 14.2 În cadrul teoriei M, tăriile celor patru forţe pot converge în mod natural.

Rezultatele menţionate în această secţiune şi în cele precedente reprezintă primii paşi făcuţi în direcţia înțelegerii consecinţelor teoriei M/teoriei corzilor asupra cosmologiei. Fizicienii anticipează că în anii ce vor urma, odată cu perfecţionarea metodelor neperturbative ale teoriei M/teoriei corzilor, aplicarea acestora la problemele cosmologice va duce la descoperiri importante.

Dar chiar și în absenţa unor metode suficient de puternice pentru înțelegerea cosmologiei din perspectiva teoriei corzilor merită să facem câteva considerații generale legate de eventualul rol al cosmologiei în căutarea teoriei ultime. Vă avertizăm că unele dintre aceste idei sunt mult mai speculative decât cele prezentate anterior, însă ele pun probleme pe care teoria finală va trebui să le abordeze.

Speculații cosmologice şi teoria ultimă

Cosmologia ne conduce la un nivel profund al cunoaşterii fiindcă a înțelege cum au început lucrurile pare – cel puțin pentru unii din noi – calea de a ne apropia cel mai mult cu putință de răspunsul la întrebarea *de ce* au apărut. Asta nu înseamnă că ştiinţa modernă oferă o legătură între întrebările „cum“ şi „de ce“ – şi poate că o asemenea legătură ştiinţifică nu va fi niciodată găsită. Studiul cosmologiei ne poate însă oferi cea mai completă înțelegere a domeniului întrebării „de ce“, iar aceasta ne permite cel puţin să avem o perspectivă ştiinţifică asupra cadrului în care se pun întrebările. Uneori, familiarizarea în profunzime cu o întrebare e cel mai bun substitut pentru răspuns.

În contextul căutării teoriei ultime, aceste reflecţii generale asupra cosmologiei conduc la consideraţii mult mai concrete. Felul în care universul ne apare astăzi – extrema dreaptă a liniei timpului din figura 14.1 – depinde, bineînţeles, de legile fundamentale ale fizicii, dar depinde şi de aspecte ale evoluţiei cosmologice – extrema stângă a aceleiaşi linii a timpului – care ar putea scăpa chiar şi celei mai profunde teorii.

Nu e greu de imaginat cum ar fi cu putinţă aşa ceva. De exemplu, să ne închipuim ce se întâmplă când aruncăm o minge în aer. Legile gravitaţiei guvernează mişcarea ulterioară a mingii, dar nu putem prezice locul unde va cădea mingea folosindu-ne de aceste legi. Trebuie

să cunoaştem şi viteza mingii – valoarea şi direcţia vitezei – în momentul în care îi dăm drumul din mână. Adică, trebuie să cunoaştem *condiţiile iniţiale* ale mişcării mingii. În mod asemănător, există trăsături ale universului care ţin şi de împrejurările istorice – motivul pentru care a apărut aici o stea sau dincolo o planetă depinde de o înlănţuire complicată de evenimente, pe care, cel puţin în principiu, ne-o putem închipui ca rezultat al unei trăsături a universului de la începuturile sale. Dar e posibil ca şi trăsături mai adânci ale universului, poate chiar proprietăţile particulelor fundamentale de materie şi de forţă să depindă direct de evoluţia istorică – evoluţie care depinde ea însăşi de condiţiile iniţiale ale universului.

De fapt, am vorbit deja despre o posibilă întruchipare a acestei idei în teoria corzilor: în universul fierbinte de la început, e posibil ca dimensiunile suplimentare să fi luat succesiv mai multe forme, stabilindu-se în cele din urmă, când temperatura a scăzut suficient, la un anume spaţiu Calabi-Yau. Dar, ca în cazul unei mingi aruncate în aer, rezultatul călătoriei prin diverse forme Calabi-Yau poate depinde de detaliile începutului călătoriei. Prin influenţa formei Calabi-Yau rezultate asupra maselor particulelor şi asupra proprietăţilor forţelor, vedem că evoluţia cosmologică şi starea universului la începuturile sale poate avea un impact profund asupra fizicii observate în prezent.

Nu cunoaştem condiţiile iniţiale ale universului, nici măcar ideile, conceptele sau limbajul care ar trebui folosite pentru a le descrie. Credem că starea iniţială de energie, densitate şi temperatură *infinite* care apare în modelul standard şi în cel inflaţionar este un semnal de alarmă că aceste teorii au eşuat şi nu constituie o descriere corectă a condiţiilor fizice care au existat cu adevărat. Teoria corzilor face un pas înainte indicând cum pot fi evitate asemenea valori infinite; nimeni însă nu ştie cum a început totul. De fapt, ignoranţa noastră persistă la un nivel şi mai înalt. Nici măcar nu ştim dacă are sens să ne punem problema determinării condiţiilor iniţiale sau dacă această problemă rămâne pentru totdeauna în afara oricărei teorii – la fel cum nu putem cere relativităţii să ne spună cât de tare se întâmplă să aruncăm mingea în aer. Fizicieni precum Hawking şi James Hartle de la Universitatea din California au încercat să aducă problema condiţiilor cosmologice iniţiale în cadrul fizicii teoretice, dar rezultatele lor au rămas neconcludente. În contextul teoriei corzilor/teoriei M, nivelul nostru de înţelegere asupra cosmologiei e prea rudimentar pentru a

stabili dacă ceea ce credem noi a fi „teoria despre tot“ își justifică numele și determină propriile sale condiții cosmologice inițiale, ridicându-le astfel la rangul de legi fizice. Aceasta e o problemă esențială pentru cercetările viitoare.

Însă, dincolo de problema condițiilor inițiale și a impactului lor asupra evoluției cosmice, s-a observat recent că ar putea exista alte limitări ale forței explicative a teoriei ultime. Nimeni nu știe dacă aceste idei aflate în afara curentului principal al științei sunt corecte sau nu. Ele pun în evidență – într-o manieră provocatoare și speculativă – un obstacol pe care orice propunere de teorie finală l-ar putea întâlni.

Ideea de bază este următoarea. Să ne imaginăm că ceea ce numim noi *universul* nu este decât o infimă parte a unei mult mai vaste întinderi cosmice, unul dintre nenumăratele universuri-insule împrăștiate de-a lungul marelui arhipelag cosmologic. Deși poate părea nerealist – și nu e exclus ca în cele din urmă așa să se și dovedească –, Andrei Linde a propus un mecanism concret care să ne conducă la un asemenea univers colosal. Linde a susținut că acea izbucnire scurtă, dar crucială, a expansiunii inflaționare nu a fost neapărat un eveniment unic. Condițiile necesare expansiunii inflaționare pot apărea de mai multe ori în regiuni izolate împrăștiate prin tot cosmosul, care suferă propria lor dilatare inflaționară, devenind noi universuri separate. Iar în fiecare dintre aceste universuri procesul continuă apărând noi universuri împrăștiate de-a lungul și de-a latul celui vechi și generând o rețea nesfârșită de bule cosmice în expansiune. Terminologia se complică, dar haideți să fim în pas cu moda și să numim această extindere a noțiunii de univers *multivers*, fiecare din părțile lui constituente fiind un univers.

În capitolul 7 am menționat că tot ce știm sugerează existența unei fizici coerente și uniforme pretutindeni în universul nostru, dar s-ar putea ca acest lucru să nu fie valabil pentru fizica din celelalte universuri, atâta vreme cât ele sunt separate de universul nostru sau se află atât de departe încât lumina lor nu a avut timp să ajungă la noi. Astfel ne putem imagina că fizica diferă de la un univers la altul. În unele dintre ele diferențele pot fi subtile. De exemplu, masa electronului sau valoarea forței tari ar putea fi cu o miime de procent mai mare sau mai mică decât în universul nostru. În altele, diferențele pot fi mai mari. De exemplu, cuarcul up ar putea fi de zece ori mai greu decât în universul nostru sau valoarea forței electromagnetice ar putea fi de zece ori mai mare decât cea măsurată de noi, cu toate

consecinţele profunde asupra stelelor şi asupra vieţii aşa cum o cunoaştem noi. În fine, în alte universuri fizica ar putea diferi şi mai mult. Tabelul particulelor şi forţelor elementare ar putea fi complet diferit de cel din universul nostru sau, intrând în domeniul teoriei corzilor, chiar şi numărul dimensiunilor extinse ar putea diferi, existând universuri comprimate având o singură dimensiune spaţială extinsă sau neavând nici una, în timp ce altele, mai vaste, ar putea avea opt, nouă sau chiar zece dimensiuni spaţiale extinse. Dacă ne-am lăsa imaginaţia să zburde, chiar şi legile fizicii ar putea fi complet diferite de la un univers la altul. Gama posibilităţilor este infinită.

Dacă trecem în revistă acest labirint uriaş de universuri, marea majoritate nu vor avea condiţii prielnice vieţii, cel puţin aşa cum o cunoaştem noi. În cazul schimbărilor drastice ale fizicii obişnuite, un lucru e clar: dacă universul nostru ar arăta cu adevărat ca Universul Furtunului, viaţa, aşa cum o ştim, nu ar exista. Dar chiar şi schimbări mai mici ale fizicii ar influenţa formarea stelelor, împiedicând de pildă stelele să acţioneze ca nişte furnale cosmice care sintetizează atomii complecşi indispensabili vieţii, cum ar fi carbonul şi oxigenul care în mod normal sunt răspândiţi în univers prin exploziile supernovelor. Viaţa depinde critic de amănuntele fizicii, prin urmare ne putem întreba de ce forţele şi particulele din natură au tocmai proprietăţile pe care le observăm. Un răspuns posibil ar fi: de-a lungul întregului multivers aceste trăsături variază enorm; proprietăţile pot fi diferite şi sunt diferite în alte universuri. Ceea ce e remarcabil la combinaţia de proprietăţi ale particulelor şi forţelor pe care le observăm este faptul că ea permite apariţia vieţii. Iar viaţa, şi în particular formele de viaţă inteligente, reprezintă o condiţie absolut necesară chiar şi pentru a ne pune întrebarea de ce universul nostru are proprietăţile pe care le are. Altfel spus, lucrurile sunt aşa cum sunt în universul nostru pentru că dacă n-ar fi aşa noi n-am exista pentru a ne pune problema. Asemeni câştigătorilor le ruleta rusească a căror mirare că au supravieţuit e temperată de înţelegerea faptului că altminteri *nu* s-ar fi mirat deloc, ipoteza multiversului poate domoli insistenţa noastră de a explica de ce universul nostru apare aşa cum îl observăm.

Acest şir de raţionamente este o versiune a unei idei vechi, cunoscută sub numele de *principiul antropic*. E o perspectivă diametral opusă încercării de a găsi o teorie unificată, rigidă, în care lucrurile sunt aşa cum sunt pentru că universul nu putea fi altfel. Multiversul şi prin-

cipiul antropic nu au eleganța inflexibilă a unei potriviri desăvârşite, ci conduc spre o colecţie anarhică de universuri cu un apetit insațiabil pentru diversitate. Va fi extrem de greu, dacă nu imposibil, să aflăm vreodată dacă ideea de multivers are legătură cu realitatea. Chiar presupunând că există şi alte universuri, ne putem imagina că nu vom intra niciodată în contact cu vreunul din ele. Dar, transgresând frontierele încă mai mult decât a făcut-o Hubble când a descoperit că galaxia noastră nu e decât una printre multe altele, noţiunea de multivers ne avertizează asupra posibilităţii ca dorinţa noastră de a găsi o teorie ultimă să fie exagerată.

O teorie ultimă ar trebui să ofere o descriere cuantică necontradictorie a tuturor forțelor și a întregii materii. Ar trebui să cerem ca teoria ultima să conducă spre o cosmologie incontestabilă a universului nostru. Dar, dacă ideea de multivers este corectă, s-ar putea să fim nerealişti cerând teoriei noastre să explice în acelaşi timp şi masele particulelor, sarcinile lor sau tăriile forțelor.

Trebuie să subliniem că, chiar acceptând premisa speculativă a multiversului, concluzia că acesta compromite capacitatea noastră de predicţie este departe de a fi sigură. Motivul este că, dacă ne lăsăm în voia imaginației şi contemplăm un multivers, ar trebui să dăm frâu liber și fanteziilor noastre teoretice şi să ne închipuim că aparentul haos al multiversului poate fi îmblânzit. O fantezie mai cuminte ne spune că, admițând ideea multiversului, am putea extinde teoria ultimă aşa încât să ne explice valorile parametrilor fundamentali din universurile constituente.

O idee mai extravagantă a fost propusă de Lee Smolin care, inspirat de asemănarea dintre condițiile existente la big bang și cele din centrul găurilor negre – densitatea colosală a materiei –, a sugerat că fiecare gaură neagră este sămânța unui nou univers care se naşte printr-o explozie de tip big bang, dar este pe veci ascuns vederii noastre de orizontul evenimentelor găurii negre. În afară de faptul că propune un nou mecanism de generare a multiversului, Smolin introduce un nou element – o versiune cosmică a mutaţiei genetice – care oferă o ieşire din limitările ştiinţifice asociate principiului antropic.[136] El ne propune să ne închipuim că atunci când un univers ţâşneşte din centrul unei găuri negre, proprietăţile sale fizice cum ar fi masele particulelor şi tăriile forțelor sunt apropiate, dar nu identice cu ale universului-părinte. Cum găurile negre apar din stele stinse, iar formarea stelelor depinde de valorile precise ale maselor particulelor şi tăriilor forțelor,

fecunditatea oricărui univers – numărul de găuri negre pe care le poate produce – depinde în mod critic de aceşti parametri. Variaţii mici ale parametrilor universurilor progenituri vor conduce la apariţia unora şi mai bine adaptate pentru producerea de găuri negre decât universul-părinte; acestea vor avea deci un număr şi mai mare de progenituri.[137] După multe „generaţii", descendenţii universurilor optimizate pentru producerea de găuri negre vor fi atât de numeroşi, încât vor domina populaţia multiversului. Astfel, în loc să invoce principiul antropic, propunerea lui Smolin oferă un mecanism dinamic care, în medie, apropie tot mai mult parametrii fiecărei noi generaţii de universuri de anumite valori optime pentru producerea de găuri negre.

Această abordare conduce la o altă explicaţie, tot în contextul multiversului, pentru materia fundamentală şi parametrii forţelor. Dacă teoria lui Smolin este adevărată şi dacă suntem unul din membrii tipici ai unui multivers matur (aceste ipoteze rămân, desigur, discutabile), parametrii forţelor şi particulelor pe care îi măsurăm ar trebui să fie optimi pentru producţia de găuri negre. Altfel spus, o modificare oricât de mică a acestor parametri ai universului nostru ar trebui să îngreuneze formarea găurilor negre. Fizicienii au început să cerceteze această predicţie, iar deocamdată nu există un consens în privinţa valabilităţii ei. Dar chiar dacă propunerea lui Smolin se va dovedi falsă, ea prezintă totuşi o altă formă sub care ar putea apărea teoria ultimă. La prima vedere, teoria ultimă ar fi lipsită de rigiditate. Am putea descoperi că ea descrie o bogăţie de universuri, dintre care multe nu au nici o relevanţă pentru universul nostru. Mai mult, ne putem imagina că această bogăţie de universuri e realizată fizic, ducând la un multivers, ceea ce, la prima vedere, limitează pentru totdeauna capacitatea noastră de predicţie. De fapt, aceste consideraţii arată că s-ar putea totuşi ajunge la o explicaţie ultimă dacă am stăpâni nu numai legile ultime, dar şi implicaţiile lor asupra evoluţiei cosmologice la o scară neaşteptat de vastă.

Consecinţele cosmice ale teoriei corzilor/teoriei M vor constitui fără îndoială un domeniu important de cercetare în secolul XXI. Fără acceleratoare capabile să producă energii la scara Planck, va trebui să ne bazăm din ce în ce mai mult pe acceleratorul cosmologic al big bang-ului şi pe relicvele pe care ni le-a lăsat prin tot universul ca date experimentale. Cu mult noroc şi perseverenţă s-ar putea să găsim răspunsul la întrebări de genul „cum a început universul?" şi

„de ce a evoluat spre forma pe care o putem vedea în cer și pe pământ?". De răspunsurile la aceste întrebări fundamentale ne desparte un teritoriu necartografiat. Dar elaborarea unei teorii cuantice a gravitației prin teoria corzilor ne îndreptățește să sperăm că posedăm acum uneltele teoretice necesare pentru a intra în regiuni vaste ale necunoscutului și a ne întoarce de acolo, după mari eforturi, cu răspunsuri la unele dintre cele mai profunde întrebări puse vreodată.

Partea a V-a
Unificarea în secolul XXI

CAPITOLUL 15

Perspective

Peste secole, teoria supercorzilor, sau evoluţia ei în cadrul teoriei M, s-ar putea îndepărta atât de mult de actuala ei formulare, încât să fie de nerecunoscut chiar şi pentru cercetătorii de frunte din ziua de azi. Pe drumul către teoria ultimă e foarte posibil să vedem că teoria corzilor nu e decât unul din paşii importanţi spre o înţelegere mai vastă a cosmosului – înţelegere care implică idei radical diferite de tot ce am întâlnit până acum. Istoria ştiintei ne învaţă că, de fiecare dată când credem că reuşim să aflăm totul, natura ne oferă o surpriză care cere schimbări importante, uneori drastice ale modului nostru de a privi lumea. Apoi, ne putem închipui, cum au făcut-o cu naivitate şi alţii înaintea noastră, că trăim un moment de răscruce în istoria omenirii, în care căutarea legilor ultime ale universului se va încheia. După cum spunea Edward Witten,

> În momentele mele de optimism, simt că teoria corzilor este atât de aproape de forma ei finală, încât, de la o zi la alta mă aştept să cadă din cer direct în braţele cuiva. Dar, dacă e să fiu realist, simt că trecem printr-un proces de construire a unei teorii mai profunde decât oricare alta de până acum, iar asta se întâmplă în secolul XXI, când eu sunt prea bătrân ca să mai am vreo idee folositoare. Fizicienilor mai tineri le va reveni sarcina să hotărască dacă într-adevăr am descoperit teoria ultimă.[138]

Deşi suntem încă sub şocul celei de-a doua revoluţii a supercorzilor şi absorbim noile idei aduse de ea, majoritatea fizicienilor cred că va fi nevoie de o a treia şi poate de o a patra revoluţie teoretică pentru a dezvălui întreaga forţă a teoriei corzilor şi a stabili rolul ei în cadrul

teoriei ultime. După cum am văzut, teoria corzilor a oferit deja o imagine remarcabilă a universului, dar există obstacole și probleme nerezolvate asupra cărora se vor concentra cercetările în secolul XXI. De aceea, nu putem încheia în acest ultim capitol povestea căutării celor mai profunde legi ale universului. Putem în schimb privi spre viitorul teoriei corzilor prezentând cinci probleme esențiale de care se vor lovi fizicienii în drumul lor spre teoria ultimă.

Care este principiul fundamental care stă la baza teoriei corzilor?

În cursul ultimului secol am învățat o lecție importantă, și anume că legile cunoscute ale fizicii sunt asociate cu principii de simetrie. Teoria relativității speciale se bazează pe simetria inclusă în principiul relativității – simetria tuturor sistemelor de referință care se deplasează cu viteză constantă. Forța gravitațională, așa cum e încorporată în teoria generală a relativității, se bazează pe principiul echivalenței – extinderea principiului relativității pentru a cuprinde toate sistemele de referință, indiferent de complexitatea stării lor de mișcare. Forțele tari, slabe și electromagnetice se bazează pe principiile mai abstracte ale simetriei de etalonare.

După cum am văzut, fizicienii tind să ridice aceste principii de simetrie la rangul de explicații. Astfel, gravitația *există* pentru ca toate sistemele posibile de referință să se afle pe picior de egalitate – altfel spus, așa încât principiul de echivalență să fie valabil. La fel, forțele negravitaționale *există* pentru ca natura să respecte simetriile de etalonare asociate lor. Această abordare face ca întrebarea „de ce există o anumită forță?" să capete forma „de ce natura respectă principiul de simetrie asociat ei?". E totuși un progres, mai ales dacă simetria în discuție pare cât se poate de naturală. De exemplu, de ce sistemul de referință al unui observator trebuie tratat diferit de al altuia? Pare mult mai firesc ca legile universului să trateze în același mod toate sistemele de referință; acest lucru e înfăptuit de principiul de echivalență și de introducerea gravitației în structura cosmosului. Deși presupune cunoștințe matematice pentru a fi înțeles, un raționament

asemănător se află în spatele simetriilor de etalonare care stau la baza celor trei forțe negravitaționale (v. capitolul 5).

Teoria corzilor ne oferă o explicație și mai profundă, pentru că toate aceste principii de simetrie, la care se adaugă încă unul – supersimetria – apar din însăși structura ei. De fapt, dacă istoria ar fi urmat un alt curs și dacă fizicienii ar fi descoperit teoria corzilor cu vreo sută de ani mai devreme, toate aceste principii ar fi fost descoperite din studiul proprietăților ei. Dar, dacă principiul echivalenței ne ajută să înțelegem oarecum de ce există gravitația, iar simetriile de etalonare ne ajută să înțelegem oarecum de ce există forțele negravitaționale, în cadrul teoriei corzilor aceste simetrii sunt *consecințe*; deși importanța lor nu e deloc diminuată, ele sunt o parte din rezultatul final al unei structuri teoretice mult mai ample.

Ajungem astfel la următoarea întrebare: este teoria corzilor o consecință inevitabilă a unui principiu mai vast – poate tot un principiu de simetrie, dar nu neapărat –, la fel cum principiul echivalenței duce inexorabil la teoria generală a relativității sau simetriile de etalonare la forțele negravitaționale? În momentul de față, nimeni n-are vreo idee cu privire la răspuns. Pentru a ne da seama de importanța lui, să ni-l imaginăm pe Einstein încercând să formuleze teoria relativității generale fără să-i fi venit în 1907, la biroul de brevete din Berna, acea fericită idee care l-a condus la principiul echivalenței. Nu ar fi fost imposibil de formulat teoria generală a relativității fără această intuiție, dar fără îndoială ar fi fost destul de dificil. Principiul echivalenței oferă un cadru succint, schematic și puternic pentru analizarea forței gravitaționale. De exemplu, prezentarea relativității generale din capitolul 3 s-a bazat în esență pe principiul echivalenței, iar rolul lui în formalismul matematic al teoriei e și mai important.

În prezent, teoreticienii corzilor sunt în situația unui Einstein care nu dispune de principiul echivalenței. De la ideea lui Veneziano din 1968, teoria a fost asamblată piesă cu piesă, descoperire după descoperire, revoluție după revoluție. Însă principiul organizatoric central care unește aceste descoperiri și toate celelalte trăsături ale teoriei într-un cadru sistematic și atotcuprinzător – un cadru care să impună cu necesitate existența fiecărui ingredient în parte – continuă să lipsească. Descoperirea acestui principiu ar marca un moment crucial în dezvoltarea teoriei corzilor și ar lămuri probabil structura ei internă. Desigur, nu avem nici o garanție că un asemenea principiu

fundamental ar exista, dar evoluţia fizicii din ultima sută de ani i-a îndemnat pe teoreticienii corzilor să creadă cu tărie în existenţa acestuia. În următoarea etapă de dezvoltare a teoriei corzilor, descoperirea „principiului inevitabilităţii“ – acea idee de bază din care rezultă cu necesitate întreaga teorie – este prioritatea numărul unu.[139]

Ce sunt de fapt spaţiul şi timpul? Ne putem oare lipsi de ele?

În multe din capitolele anterioare am folosit fără reţinere conceptele de spaţiu şi timp. În capitolul 2 am prezentat descoperirea lui Einstein că spaţiul şi timpul sunt inexorabil legate între ele datorită faptului că mişcarea unui obiect prin spaţiu influenţează trecerea lui prin timp. În capitolul 3 am înţeles mai adânc rolul spaţiului-timp în descrierea cosmosului cu ajutorul teoriei generale a relativităţii, care arată că forma detaliată a texturii spaţio-temporale transmite forţa gravitaţională de la un loc la altul. După cum am văzut în capitolele 4 şi 5, ondulaţiile cuantice violentele ale structurii microscopice a texturii necesitau o nouă teorie, fapt care ne-a condus la teoria corzilor. Şi, în fine, în capitolele ce au urmat, am văzut că teoria corzilor afirmă că universul are mult mai multe dimensiuni decât sesizăm noi, dintre care unele sunt încolăcite în forme minuscule şi complicate care pot suferi transformări în cadrul cărora textura lor poate fi străpunsă şi ruptă, pentru ca în final să se repare singură.

Prin reprezentările grafice ca acelea din figurile 3.4, 3.6, şi 8.10 am încercat să ilustrăm aceste idei considerând textura spaţiului şi timpului ca un material din care e croit universul. Aceste imagini sunt sugestive şi sunt deseori folosite de fizicieni pentru a-şi vizualiza tehnicile matematice. Privind timp îndelungat asemenea figuri căpătăm treptat impresia că le înţelegem. Şi totuşi, nu ne putem împiedica să ne întrebăm: ce înseamnă de fapt textura universului?

Este o întrebare profundă care, sub o formă sau alta, a constituit subiectul dezbaterilor vreme de sute de ani. Newton a susţinut că spaţiul şi timpul sunt ingrediente eterne şi imuabile care alcătuiesc cosmosul, structuri primordiale aflate dincolo de orice întrebări sau explicaţii. După cum spunea în *Principia*: „Spaţiul absolut, prin natura lui,

fără legătură cu ceva din afară, rămâne mereu neschimbător şi imobil. Timpul absolut, real şi matematic, de la sine şi prin natura lui, curge uniform fără vreo legătură cu ceva din afară."[140] Gottfried Leibniz şi alţii au respins ideea, susţinând că spaţiul şi timpul nu sunt decât instrumente de contabilizare menite a rezuma în mod convenabil relaţiile dintre obiectele şi evenimentele din univers. Poziţia unui obiect în spaţiu şi în timp are sens doar dacă e comparată cu o alta. Spaţiul şi timpul constituie vocabularul acestor relaţii, nimic mai mult. Deşi perspectiva lui Newton, susţinută de succesul experimental al celor trei legi ale mişcării, s-a impus timp de mai bine de două sute de ani, ideile lui Leibniz, dezvoltate în continuare de fizicianul austriac Ernst Mach, sunt mai apropiate de actuala noastră imagine. După cum am văzut, teoriile relativităţii specială şi generală ale lui Einstein au înlăturat noţiunile universale şi absolute de spaţiu şi timp. Dar încă ne mai putem întreba dacă modelul geometric al spaţiului şi timpului, care joacă un rol central în teoria generală a relativităţii şi în teoria corzilor, este doar o expresie convenabilă pentru relaţiile spaţiale şi temporale între diferite poziţii sau dacă ar trebui să ne considerăm încorporaţi în *ceva* atunci când vorbim despre cufundarea noastră în textura spaţio-temporală.

Deşi intrăm într-un teritoriu al speculaţiilor, teoria corzilor sugerează un răspuns la această întrebare. Gravitonul, cel mai mic pachet de forţă gravitaţională, este un mod particular de vibraţie a corzii. Şi, la fel cum un câmp electromagnetic, de pildă lumina vizibilă, e compus dintr-un număr enorm de fotoni, un câmp gravitaţional e compus dintr-un număr enorm de gravitoni, adică un număr enorm de corzi care execută modul de vibraţie a gravitonului. La rândul lor, câmpurile gravitaţionale sunt codificate în curbura texturii spaţio-temporale, iar astfel suntem îndemnaţi să identificăm însăşi textura spaţio-temporală cu un număr colosal de corzi, toate aflate în acelaşi mod de vibraţie ordonată a gravitonului. În limbajul fizicii, o asemenea mulţime de corzi vibrând la unison poartă numele de *stare coerentă* a corzilor. Este o imagine mai curând poetică – corzile din teoria corzilor ca fire ale texturii spaţio-temporale – dar să nu uităm că semnificaţia ei riguroasă nu e încă pe deplin lămurită.

Prezentarea texturii spaţio-temporale ca o ţesătură de corzi ne conduce la următoarea întrebare. O bucată de ţesătură obişnuită este produsul final al muncii cuiva care a ţesut cu atenţie firele individuale,

materia primă a textilelor. Păstrând analogia, ne putem întreba dacă există un precursor brut al texturii spațio-temporale – o configurație a corzilor texturii cosmice dinainte ca ele să se fi reunit pentru a alcătui forma organizată pe care o numim spațiu-timp. Observați că apare o anume imprecizie când vorbim despre această stare ca despre o masă dezordonată de corzi individuale vibrante ce urmează să fie țesute într-un tot ordonat pentru că, în felul nostru obișnuit de a gândi, aceasta presupune deja noțiunile de spațiu și timp – spațiul în care o coardă vibrează și curgerea timpului care ne permite să-i urmărim schimbările de formă de la un moment la altul. Dar în starea brută, anterioară organizării corzilor sub forma texturii cosmice în care să execute acel dans ordonat și coerent al vibrațiilor, *nu există noțiunile de spațiu și timp*. Limbajul nu ne ajută să exprimăm aceste idei, pentru că de fapt nu există nici măcar noțiunea de *înainte*. Într-un anume sens, e ca și cum corzile individuale ar fi „cioburi“ de spațiu și timp, și doar când ajung să vibreze la unison apar noțiunile convenționale de spațiu și timp.

A-ți imagina o stare primară, lipsită de orice structură, în care nu există noțiunile de spațiu și timp așa cum le cunoaștem, împinge la limită puterea de înțelegere a majorității oamenilor (pe a mea, cel puțin). Ca în gluma lui Stephen Wright despre fotograful obsedat să facă o poză de aproape a orizontului, ajungem la o incompatibilitate a paradigmelor când încercăm să ne închipuim un univers care *există*, dar nu face apel la conceptele de spațiu și timp. Va trebui totuși să ne obișnuim cu asemenea idei și să înțelegem cum se aplică ele înainte de a putea evalua pe deplin teoria corzilor. Motivul este că formularea actuală a teoriei corzilor presupune existența spațiului și timpului în cadrul cărora corzile (și celelalte ingrediente ale teoriei M) se mișcă și vibrează. Acest lucru ne permite să deducem proprietățile fizice ale teoriei corzilor într-un univers cu o dimensiune temporală, un anumit număr de dimensiuni spațiale extinse (considerate în general a fi trei) și dimensiuni suplimentare care sunt încolăcite într-una din formele permise de ecuațiile teoriei. E ca și cum ai evalua talentul unui pictor cerându-i să folosească numere corespunzând culorilor. O notă personală va putea fi până la urmă detectată, dar constrângerile sunt atât de drastice, încât vom vedea doar foarte puțin din înzestrarea lui. În mod asemănător, cum triumful teoriei corzilor s-a bazat pe încorporarea naturală a mecanicii cuantice și gravitației, și cum gravitația este legată de forma spațiului și timpului, nu ar trebui să impunem

constrângeri asupra teoriei obligând-o să opereze într-un cadru spațio-temporal preexistent. Dimpotrivă, așa cum îl lăsăm pe artist să improvizeze pe o pânză albă, ar trebui să permitem teoriei corzilor să-și *creeze* propria arenă spațio-temporală, pornind de la o configurație fără spațiu și fără timp.

Speranța este că pornind de la o pânză albă – poate dintr-o epocă dinainte de big bang – teoria va descrie un univers ce evoluează spre o formă în al cărei fundal apar vibrații coerente ale corzilor care produc noțiunile convenționale de spațiu și timp. Un asemenea cadru – presupunând că am ajunge la el – ar arăta că spațiul, timpul și, prin asociere, dimensiunea nu sunt elemente definitorii esențiale ale universului, ci noțiuni convenabile care apar dintr-o stare primară, mai profundă.

Studiile asupra unor aspecte ale teoriei M întreprinse de Stephen Shenker, Edward Witten, Tom Banks, Willy Fischler, Leonard Susskind și mulți alții au arătat deja că ceva cunoscut sub numele de *zero-brană* (poate cel mai simplu ingredient al teoriei M, un obiect care se comportă asemănător unei particule punctiforme la distanțe mari, dar are proprietăți radical diferite la distanțele mici) ne-ar putea da o idee despre acest domeniu fără spațiu și fără timp. Cercetările lor au dezvăluit că, dacă corzile ne arată că noțiunile convenționale de spațiu și timp își încetează relevanța sub lungimea Planck, zero-branele conduc în esență la aceeași concluzie, dar deschid și calea către un cadru neconvențional. Studiile făcute asupra acestor zero-brane indică faptul că geometria obișnuită este înlocuită cu ceva cunoscut sub numele de geometrie *necomutativă*, un domeniu al matematicii dezvoltat în mare parte de matematicianul francez Alain Connes.[141] În acest cadru geometric, noțiunile convenționale de spațiu și distanță dintre puncte dispar, lăsându-ne într-un peisaj conceptual foarte diferit. Fizicienii au arătat însă că atunci când ne concentrăm atenția asupra unor scări de lungime mai mari decât scara Planck, noțiunea noastră convențională de spațiu apare din nou. E posibil ca acest cadru al geometriei necomutative să fie încă departe de starea primară a pânzei albe, dar ne dă o idee despre ce-ar putea însemna un cadru mai cuprinzător care să înglobeze spațiul și timpul.

Găsirea aparatului matematic corect pentru a formula teoria corzilor fără a recurge la noțiunile preexistente de spațiu și timp este unul dintre cele mai importante obiective ale teoreticienilor corzilor.

Înțelegerea felului în care apar spațiul și timpul ne-ar putea indica ce formă geometrică apare *în realitate*.

Va duce teoria corzilor la reformularea mecanicii cuantice?

Universul este guvernat cu precizie extremă de mecanica cuantică. Dar chiar și așa, în ultima jumătate de secol fizicienii au folosit în formularea teoriilor lor strategii care, din punct de vedere structural, plasează mecanica cuantică într-o poziție secundară. În elaborarea teoriilor, fizicienii încep de multe ori prin a folosi un limbaj pur clasic care ignoră probabilitățile cuantice, funcțiile de undă etc. – un limbaj perfect inteligibil fizicienilor din epoca lui Maxwell, ba chiar și din cea a lui Newton – suprapunând ulterior concepte cuantice peste cadrul clasic. Această abordare nu trebuie să ne surprindă, fiindcă ea reflectă direct experiența noastră. La prima vedere, universul pare guvernat de legi înrădăcinate în concepte clasice – de pildă, o particulă având poziția și viteza bine definite la orice moment de timp. Doar după o cercetare amănunțită la nivel microscopic ne dăm seama că aceste idei clasice, familiare trebuie modificate. Evoluția fizicii ne-a făcut să trecem de la cadrul clasic la unul modificat de perspectiva cuantică, iar acest drum străbătut se reflectă în felul în care fizicienii își construiesc și în ziua de azi teoriile.

Așa stau lucrurile fără îndoială și în cazul teoriei corzilor. Formalismul matematic al teoriei corzilor începe cu ecuații care descriu mișcarea unui fir *clasic* minuscul, infinit de subțire – ecuații pe care, în cea mai mare parte, și Newton le-ar fi putut scrie acum trei sute de ani. Apoi aceste ecuații sunt *cuantificate*. Adică, într-o manieră sistematică elaborată de fizicieni în cursul ultimilor 50 de ani, ecuațiile clasice sunt convertite într-un cadru cuantic unde probabilitățile, incertitudinea, agitația cuantică etc. sunt încorporate direct. De fapt, în capitolul 12 am văzut acest procedeu în acțiune: procesele cu bucle (vezi figura 12.6) includ concepte cuantice – în acest caz, crearea și anihilarea perechilor de corzi virtuale – în care numărul de bucle determină precizia cu care sunt luate în considerare efectele cuantice.

Strategia de a începe cu o descriere teoretică clasică și de a include ulterior trăsăturile cuantice s-a dovedit extrem de productivă timp de

mulți ani. De exemplu, această metodă stă la baza modelului standard al fizicii particulelor. E însă posibil, ba chiar probabil, ca această metodă să fie prea conservatoare pentru a fi aplicată teoriei corzilor sau teoriei M. Odată ce am înțeles că universul nostru este guvernat de principiile mecanicii cuantice, teoriile noastre ar trebui să fie cuantice de la bun început. Până acum ne-am descurcat pornind de la o perspectivă clasică, dar asta s-a datorat faptului că nu am sondat universul la un nivel suficient de adânc pentru ca această abordare grosieră să ne inducă în eroare. Teoria corzilor și teoria M ajung însă la un nivel de profunzime la care nu mai putem folosi această strategie.

Putem găsi dovezi în sprijinul acestei afirmații examinând unele din ideile apărute cu prilejul celei de-a doua revoluții a supercorzilor (așa cum sunt rezumate, de exemplu, în figura 12.11). După cum am văzut în capitolul 12, dualitățile care stau la baza unității celor cinci teorii ale corzilor ne arată că procesele fizice care au loc într-una din formulări pot fi reinterpretate în limbajul dual al oricărei alta. La prima vedere, această reformulare nu pare să aibă multe în comun cu descrierea inițială, dar de fapt e vorba doar de aplicarea dualității. Cu ajutorul dualității, un proces fizic poate fi descris în mai multe moduri foarte diferite. Aceste rezultate sunt deopotrivă subtile și remarcabile, dar nu am menționat încă trăsătura lor cea mai importantă.

Prin transformările duale, un anume proces, descris într-una din cele cinci teorii, proces *puternic* dependent de mecanica cuantică (de pildă, un proces implicând interacții ale corzilor care nu ar avea loc dacă lumea ar fi guvernată de fizica clasică) e reformulat, din perspectiva altei teorii a corzilor, ca un proces *slab* dependent de mecanica cuantică (de pildă, un proces ale cărui proprietăți numerice detaliate sunt influențate de considerații cuantice, dar a cărui formă calitativă seamănă cu ce s-ar întâmpla într-o lume pur clasică). Asta înseamnă că mecanica cuantică e consubstanțială simetriilor de dualitate care leagă teoriile corzilor și teoria M. Ele sunt *simetrii inerent cuantice* pentru că una dintre descrierile duale este puternic influențată de considerații cuantice. Acest lucru arată că formularea completă a teoriei corzilor/teoriei M – formulare ce încorporează în mod fundamental noile simetrii duale – nu poate începe clasic, pentru a fi apoi cuantificată. Un punct de pornire clasic va omite în mod obligatoriu simetriile duale, ele apărând doar dacă se ia în considerare mecanica cuantică.

Se pare că formularea completă a teoriei corzilor/M va trebui să spargă tiparele tradiționale și să apară ca o teorie întru totul cuantică.

Deocamdată nimeni nu știe cum se poate realiza acest lucru. Dar mulți dintre teoreticienii corzilor prevăd că o reformulare a modului în care principiile cuantice sunt încorporate în descrierea teoretică a universului va constitui următoarea revoluție majoră. De pildă, Cumrun Vafa spunea: „Cred că o reformulare a mecanicii cuantice care să rezolve multe dintre enigmele ei va apărea în curând. Cred că mulți împărtășesc opinia că descoperirea noilor dualități indică apariția unui cadru nou, mai geometric, pentru mecanica cuantică, în care spațiul, timpul și proprietățile cuantice vor fi unite în mod inseparabil.“[142] Iar Edward Witten spunea: „Cred că statutul logic al mecanicii cuantice se va schimba într-o manieră asemănătoare celei în care s-a schimbat și statutul logic al gravitației atunci când Einstein a descoperit principiul echivalenței. Acest proces e departe de a fi încheiat pentru mecanica cuantică, dar cred că într-o bună zi oamenii vor privi în urmă spre epoca noastră considerând-o perioada în care procesul a început.“[143]

Păstrându-ne optimismul moderat, putem prevedea că o reformulare a principiilor mecanicii cuantice în cadrul teoriei corzilor poate duce la un formalism mai puternic care să ne spună cum a apărut universul și de ce există spațiul și timpul – un formalism care ne va apropia de răspunsul la întrebarea lui Leibniz de ce există ceva mai degrabă decât nimic.

Poate fi testată experimental teoria corzilor?

Printre numeroasele trăsături ale teoriei corzilor despre care am vorbit în capitolele anterioare, următoarele trei sunt poate cel mai important de reținut. Mai întâi, gravitația și mecanica cuantică sunt parte integrantă din funcționarea universului, deci orice candidat la teoria unificată trebuie să le încorporeze pe ambele. Teoria corzilor izbutește acest lucru. În al doilea rând, fizica ultimului secol a demonstrat că există și alte idei-cheie – multe dintre ele au fost confirmate experimental – care par esențiale pentru înțelegerea universului. Printre ele se numără noțiuni precum spinul, structura de familii a particulelor de materie, particulele mesager, simetriile de etalonare,

principiul echivalenței, ruperea simetriei și supersimetria. Toate aceste concepte apar natural din teoria corzilor. În al treilea rând, spre deosebire de teorii mai convenționale, de pildă modelul standard care are 19 parametri liberi ce pot fi ajustați pentru a obține acordul cu măsurătorile experimentale, teoria corzilor nu are parametri ajustabili. În principiu, concluziile sale ar trebui să fie precise și bine definite, făcând astfel cu putință testarea neambiguă a teoriei.

Drumul de la acest raționament „în principiu“ la faptele „practice“ este îngreunat de numeroase obstacole. În capitolul 9 am prezentat o parte dintre obstacolele tehnice, de exemplu determinarea formei dimensiunilor suplimentare, care ne barează deocamdată calea. În capitolele 12 și 13 am plasat aceste obstacole în contextul mai larg al nevoii noastre de a ajunge la o înțelegere riguroasă a teoriei corzilor, care, după cum am văzut, ne conduce în mod natural spre teoria M. Înțelegerea deplină a teoriei corzilor/M va presupune fără îndoială multă muncă și multă ingeniozitate.

La fiecare pas, teoreticienii corzilor au căutat și vor continua să caute consecințe ale teoriei observabile experimental. Să nu pierdem din vedere posibilitățile indirecte de a găsi dovezi în favoarea teoriei corzilor prezentate în capitolul 9. Apoi, când vom înțelege lucrurile mai în profunzime, vom descoperi și alte procese sau trăsături rare ale teoriei corzilor care vor sugera alte dovezi experimentale indirecte.

Dar, lucrul cel mai important, confirmarea supersimetriei prin descoperirea particulelor superpartener, după cum am văzut în capitolul 9, ar fi un moment de răscruce pentru teoria corzilor. Să ne amintim că supersimetria a fost descoperită în cursul studiilor teoretice privind corzile și că ea constituie o parte centrală a teoriei. Confirmarea ei experimentală ar fi o dovadă indirectă, dar puternică, în favoarea teoriei corzilor. În plus, găsirea particulelor superpartener ar constitui o provocare binevenită, căci descoperirea supersimetriei ar avea consecințe mult mai importante decât un simplu răspuns prin da sau nu. Masele și sarcinile particulelor superpartener ar dezvălui detaliile modului de includere a supersimetriei în cadrul legilor naturii. Apoi, fizicienii ar trebui să verifice dacă teoria corzilor poate explica toate acestea. Putem fi desigur mai optimiști sperând că în următorul deceniu, până la inaugurarea acceleratorului de particule de la Geneva, cunoașterea teoriei corzilor va progresa suficient pentru a fi făcute predicții

detaliate despre superparteneri, înainte de mult-aşteptata lor descoperire. Confirmarea unor asemenea predicţii ar constitui un moment istoric.

Există limite pentru explicaţii?

A explica totul – chiar şi în sensul restrâns al înţelegerii forţelor şi constituenţilor elementari ai universului – este una dintre cele mai mari provocări cu care s-a confruntat ştiinţa. Şi, pentru prima dată, teoria corzilor oferă cadrul ce pare a avea profunzimea necesară acestei întreprinderi. Dar vom ajunge oare să folosim pe de-a întregul posibilităţile teoriei şi să calculăm masele cuarcilor sau tăria forţei electromagnetice, numere a căror valoare precisă ne spune atât de multe despre univers? Va trebui fără îndoială să depăşim numeroase obstacole pentru a atinge aceste obiective. În momentul de faţă, cel mai important dintre ele este obţinerea unei formulări neperturbative complete a teoriei corzilor/teoriei M.

Chiar dacă am înţelege pe deplin teoria corzilor/teoria M, dispunând şi de o nouă şi mult mai transparentă formulare a mecanicii cuantice, există oare posibilitatea ca nici atunci să nu reuşim să calculăm masele particulelor şi tăriile forţelor? E posibil să avem nevoie tot de măsurători experimentale în locul calculelor teoretice? Apoi, acest insucces nu ar putea însemna că, în loc să căutăm alte şi alte teorii mai profunde, trebuie să ne resemnăm cu concluzia că pur şi simplu aceste proprietăţi observabile ale lumii *nu* se pot explica?

Un răspuns imediat la aceste întrebări ar fi afirmativ. După cum spunea Einstein, „lucrul cel mai greu de înţeles despre univers este că poate fi înţeles“.[144] În această epocă a progreselor rapide şi impresionante a dispărut cu totul mirarea în faţa capacităţii noastre de a înţelege, măcar în parte, universul. Va trebui poate să acceptăm că şi după ce am atins cel mai profund nivel de înţelegere pe care ni-l poate oferi ştiinţa, vor exista aspecte ale universului care rămân neexplicate. Va trebui poate să acceptăm că anumite trăsături ale universului sunt aşa cum sunt din întâmplare, dintr-un accident sau prin alegerea divină. Succesele metodei ştiinţifice din trecut ne-au încurajat să credem că, în timp şi cu efort, misterele naturii *pot* fi dezvăluite. Însă atingerea limitei absolute a explicaţiilor ştiinţifice – care

n-are legătură cu vreun obstacol tehnologic sau cu un anume stadiu al înțelegerii umane – ar fi un eveniment straniu pentru care nu am fost pregătiți.

Deşi are o mare relevanţă în căutarea teoriei ultime, aceasta e o problemă pe care n-o putem rezolva deocamdată; mai mult, posibilitatea existenței unor limite ale explicației ştiințifice, în sensul larg pe care l-am definit aici, e o problemă care s-ar putea să nu fie niciodată rezolvată. Am văzut, de pildă, că până şi noțiunea speculativă de multivers, care la prima vedere pare să prezinte o limită clară pentru explicaţia ştiinţifică, poate fi abordată închipuindu-ne teorii la fel de speculative care, cel puţin în principiu, pot restabili capacitatea de predicție.

Aceste considerații subliniază rolul cosmologiei în determinarea consecințelor unei teorii ultime. După cum am văzut, cosmologia supercorzilor este un domeniu nou chiar şi în raport cu teoria corzilor. Va fi fără îndoială un domeniu important de cercetare în anii următori. Pe măsură ce vom afla tot mai multe lucruri despre teoria corzilor/M, capacitatea noastră de a evalua implicaţiile cosmologice ale acestei încercări de unificare a teoriilor va spori. E posibil, desigur, ca asemenea studii să ne convingă într-o bună zi că există într-adevăr o limită a explicațiilor ştiintifice. Dar e posibil şi să intrăm într-o nouă eră care să ne aducă explicarea fundamentală a universului.

Urcând către stele

Deşi tehnologic suntem legaţi de Pământ şi de vecinii imediaţi din sistemul solar, prin puterea gândului şi a experimentului am sondat adâncurile macrocosmosului şi microcosmosului. În ultima sută de ani mai cu seamă, prin eforturile colective ale fizicienilor au fost dezvăluite unele din secretele cele mai bine păstrate ale naturii. Şi, odată dezvăluită, această bogăţie de explicaţii a deschis perspective asupra unei lumi pe care credeam că o cunoaştem, dar a cărei splendoare nu ne-o închipuiam nici pe departe. O măsură a profunzimii unei teorii fizice este gradul în care pune sub semnul întrebării aspecte ale lumii care anterior păreau imuabile. În acest sens, mecanica cuantică şi teoriile relativităţii depăşesc toate aşteptările: funcţii de undă,

probabilități, tunelare cuantică, fluctuații neîncetate ale vidului, contopirea spațiului și timpului, natura relativă a simultaneității, curbarea texturii spațio-temporale, găuri negre, big bang. Cine și-ar fi imaginat că precisa și intuitiva perspectivă newtoniană se va dovedi atât de limitată, că imediat sub coaja lucrurilor pe care le cunoaștem nemijlocit există o întreagă lume nouă, tulburătoare?

Dar chiar și aceste descoperiri care au zguduit din temelii paradigmele noastre sunt doar o parte dintr-o poveste mult mai vastă, atotcuprinzătoare. Încredințați că legile microcosmosului și macrocosmosului trebuie să se armonizeze într-un întreg coerent, fizicienii caută fără încetare misterioasa teorie unificatoare. Căutarea nu s-a încheiat, dar prin teoria corzilor și prin evoluția ei spre teoria M a apărut, în sfârșit, un cadru convingător care îmbină mecanica cuantică, teoria generală a relativității, forțele tari, slabe și electromagnetice. Priveliștea care ni se înfățișează e fantastică: bucle de corzi și bule oscilante care unifică toată creația prin moduri de vibrație într-un univers cu numeroase dimensiuni ascunse ce poate suferi deformări violente în care textura spațială se rupe pentru ca apoi să se repare singură. Cine ar fi putut bănui că fuziunea gravitației cu mecanica cuantică într-o teorie unificatoare a întregii materii și a tuturor forțelor va schimba atât de mult perspectiva noastră asupra universului?

Ne vor aștepta fără îndoială surprize și mai mari pe măsură ce ne vom apropia de înțelegerea deplină și matematic calculabilă a teoriei corzilor. Cercetările asupra teoriei M dezvăluie deja existența unui domeniu straniu sub lungimea Planck, în care noțiunile de spațiu și timp s-ar putea să nu-și mai aibă locul. La extrema cealaltă, am văzut că universul nostru ar putea fi doar una dintre numeroasele bule de spumă de la suprafața unui vast și turbulent ocean cosmic numit multivers. Aceste idei sunt cele mai recente speculații, dar ele ar putea vesti următorul salt în cunoașterea universului.

Dacă privim spre viitor și încercăm să ne închipuim toate minunile care ne pot aștepta, ar trebui să privim și în urmă la drumul parcurs. Căutarea legilor fundamentale ale universului este o drama profund umană care ne-a îmbogățit mintea și spiritul. Întreg acest efort omenesc e cuprins în cuvintele cu care Einstein vorbește despre încercarea sa de a înțelege gravitația – „anii aceia de căutare febrilă în întuneric, dorința nesfârșită, valuri de încredere și disperare, iar în cele din urmă ieșirea la lumină“[145]. Cu toții căutăm, fiecare în felul lui, adevărul, și

cu toții tânjim să aflăm de ce suntem aici. Pe măsură ce urcăm împreună muntele explicațiilor, fiecare generație sprijinindu-se pe umerii înaintașilor, năzuim cu temeritate să ajungem în vârf. Nu putem ști dacă vreunul din urmașii noștri va ajunge să contemple din vârf cu claritate infinită vastul și elegantul univers. Dar fiecare generație urcă puțin mai sus, căci, după cum spunea Jacob Bronowski, „în fiecare epocă există un punct de cotitură, un nou mod de a privi și înțelege coerența lumii“[146]. Iar în timp ce generația noastră se minunează de noua perspectivă asupra universului – un nou mod de a înțelege coerența lumii – noi ne îndeplinim misiunea de a mai adăuga o treaptă la scara ce duce către stele.

Note

1 Tabelul de mai jos este o detaliere a tabelului 1.1. Conține masele și sarcinile de forță ale particulelor din toate cele trei familii. Fiecare tip de cuarc poate avea trei tipuri de sarcini de forță tare numite culori – acestea reprezintă valorile numerice ale sarcinilor de forță tare. Sarcinile de forță slabă sunt, în termeni tehnici, „cea de-a treia componentă" a izospinului slab. (Nu am inclus aici componentele de „mână dreaptă" ale particulelor – ele diferă prin aceea că nu au sarcini slabe.)

Familia 1

Particula	*Masa*	*Sarcina electrică*	*Sarcina slabă*	*Sarcina tare*
Electron	0,00054	–1	–1/2	0
Neutrin electronic	$<10^{-8}$	0	1/2	0
Cuarcul up (sus)	0,0047	2/3	1/2	roșu, verde, albastru
Cuarcul down (jos)	0,0074	–1/3	–1/2	roșu, verde, albastru

Familia 2

Particula	*Masa*	*Sarcina electrică*	*Sarcina slabă*	*Sarcina tare*
Miuon	0,11	–1	–1/2	0
Neutrin miuonic	<0,0003	0	1/2	0
Cuarcul charm (farmec)	1,6	2/3	1/2	roșu, verde, albastru
Cuarcul strange (straniu)	0,16	–1/3	–1/2	roșu, verde, albastru

Familia 3

Particula	***Masa***	***Sarcina electrică***	***Sarcina slabă***	***Sarcina tare***
Tau	1,9	−1	−1/2	0
Neutrin taonic	<0,033	0	1/2	0
Cuarcul top (vârf)	189	2/3	1/2	roşu, verde, albastru
Cuarcul bottom (dedesubt)	5,2	−1/3	−1/2	roşu, verde, albastru

2 Corzile pot avea două capete libere (aşa-numitele *corzi deschise*), spre deosebire de buclele ilustrate in figura 1.1 (care se mai numesc şi *corzi închise*). Pentru a simplifica prezentarea, în cea mai mare parte a cărţii ne vom concentra asupra corzilor închise, dar în principiu tot ce vom spune se aplică în ambele cazuri.

3 Albert Einstein, într-o scrisoare din 1942 către un prieten, citată de Tony Hey şi Patrick Walters în *Einstein's mirror* (Cambridge, Anglia: Cambridge University Press, 1997).

4 Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory* (New York: Pantheon, 1992), p. 52.

5 Interviu cu Edward Witten, 11 mai 1998.

6 Prezenţa obiectelor masive precum Pământul complică situaţia prin introducerea forţelor gravitaţionale. Cum noi ne îndreptăm atenţia acum numai asupra mişcării pe orizontală – nu şi pe verticală – putem ignora prezenţa Pământului. În capitolul următor vom vorbi mai pe larg despre gravitaţie.

7 Mai exact, viteza luminii *în spaţiul vid* este de 670 de milioane de mile pe oră (300 000 km/s). Când lumina călătoreşte printr-o substanţă, cum ar fi aer sau sticlă, viteza ei scade într-un mod oarecum similar cu modul în care viteza pietrei aruncate de pe faleză scade când intră în apă. Această scădere a vitezei luminii faţă de viteza din vid nu are nici un fel de consecinţe în teoria relativităţii, aşa că o vom ignora.

8 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm ca aceste observaţii pot fi exprimate şi cantitativ. De exemplu, dacă ceasul în mişcare are viteza v, iar fotonul său parcurge un drum dus-întors în t secunde (măsurate de ceasul nostru staţionar), atunci ceasul aflat în mişcare va fi parcurs distanţa vt când fotonul se întoarce la oglinda de jos. Folosind teorema lui Pitagora, calculăm lungimea fiecăruia din cele două drumuri oblice parcurse de foton în figura 2.3 ca fiind, $\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$ unde h este distanţa dintre cele două oglinzi ale ceasului cu lumină. Prin urmare, lungimea celor două drumuri, luate împreună, este de $2\sqrt{(vt/2)^2 + h^2}$. Cum viteza luminii are o valoare constantă – de obicei notată

cu c – atunci fotonului îi vor trebui $2\sqrt{(vt/2)^2+h^2}/c$ secunde ca să parcurgă drumul dus-întors. Astfel obținem ecuația $t=2\sqrt{(vt/2)^2+h^2}/c$ din care putem extrage valoarea lui t, obținând astfel $t=2h/\sqrt{c^2-v^2}$. Ca să evităm confuziile, să scriem acest rezultat sub forma $t_{mişcare}=2h/\sqrt{c^2-v^2}$, unde indicele semnifică faptul că acesta e timpul măsurat între două ticăituri consecutive ale ceasului în mişcare. Pe de altă parte, timpul dintre două ticăituri consecutive ale ceasului staționar este $t_{staționar}=2h/c$, de unde cu puțină algebră obținem formula $t_{mişcare}=t_{staționar}/\sqrt{1-v^2/c^2}$, care ne arată în mod direct că ticăiturile au loc mai rar la ceasul în mişcare decât la ceasul staționar. Aceasta înseamnă de asemenea că între două evenimente oarecare numărul total de ticăituri ale ceasului în mişcare este mai mic decât numărul de ticăituri ale ceasului staționar, ceea ce se traduce prin faptul că timpul scurs pentru observatorul în mişcare este mai mic decât pentru observatorul staționar.

9 Dacă vă convinge mai uşor un alt gen de experiment decât cel din acceleratorul de particule, iată un alt exemplu. În octombrie 1971, J. C. Hafele, pe atunci la Universitatea Washington din St. Luis, şi Richard Keating, de la Observatorul Naval al Statelor Unite, au montat ceasuri atomice cu cesiu la bordul unor avioane comerciale care au zburat vreme de 40 de ore. După ce luăm în considerare o seamă de efecte subtile ale gravitației (care vor fi prezentate în capitolul următor), relativitatea specială susține că timpul total măsurat de ceasurile atomice în mişcare trebuie să fie mai scurt decât cel măsurat de ceasurile rămase pe sol cu câteva sute de miliardimi de secundă. Exact asta au găsit Hafele şi Keating: timpul se scurge într-adevăr mai încet pentru ceasurile în mişcare.

10 Deşi figura 2.4 ilustrează în mod corect contracția unui obiect de-a lungul direcției sale de mişcare, imaginea nu ilustrează ceea ce am vedea de fapt dacă un obiect ar zbura prin apropierea noastră cu o viteză apropiată de viteza luminii (presupunând că vederea noastră sau aparatul de fotografiat sunt suficient de bune pentru a putea distinge ceva!). Pentru a vedea ceva, ochii noştri – sau aparatul de fotografiat – trebuie să capteze lumina care se reflectă de pe suprafața obiectului. Dar din moment ce lumina pe care o vedem este reflectată din diverse zone ale obiectului, ea parcurge în drumul spre noi distanțe diferite. Aceasta are ca efect o iluzie vizuală relativistă în care obiectul va apărea nu numai scurtat pe direcția mişcării, dar şi rotit.

11 Pentru cititorul cu înclinații matematice, menționăm că din vectorul spațio-temporal 4-dimensional, $x=(ct,x_1,x_2,x_3)=(ct,\bar{x})$, putem produce viteza 4-dimensională, $u=dx/d\tau$, unde t este timpul propriu definit ca $d\tau^2=dt^2-c^{-2}(dx_1^2+dx_2^2+dx_3^2)$. Atunci „viteza prin spațiu-timp" este mărimea 4-vectorului u, $\sqrt{(c^2dt^2-d\bar{x}^2)/(dt^2-c^{-2}d\bar{x}^2)}$, care este identic egală cu c. Acum putem rearanja ecuația $c^2(dt/d\tau)^2-(d\bar{x}/d\tau)^2=c^2$ sub forma $c^2(d\tau/dt)^2+(dx/dt)^2=c^2$.

Aceasta arată cum creşterea vitezei prin spaţiu a unui obiect, $\sqrt{(dx/dt)^2}$, este însoţită de descreşterea lui $d\tau/dt$, care este viteza obiectului prin timp (ritmul cu care se scurge timpul conform ceasului propriu, $d\tau$, spre deosebire de ritmul curgerii timpului conform ceasului staţionar, dt.)

12 Isaac Newton, *Sir Isaac Newton's Mathematical Principle of Natural Philosophy and His System of the World*, traducere de A. Motte şi Florian Cajori (Berleley: University of California Press, 1962), vol. I, pag. 634.

13 Mai exact spus, Einstein a înţeles că principiul echivalenţei e valabil atât timp cât observaţiile noastre sunt limitate la o regiune mică din spaţiu – adică atât timp cât compartimentul e suficient de mic. Motivul este următorul. Câmpul gravitaţional poate varia în intensitate (şi în direcţie) de la un loc la altul. Dar noi ne imaginăm că întreg compatimentul e accelerat ca o singură unitate şi prin urmare acceleraţia simulează un singur câmp uniform de forţă gravitaţională. Pe măsură ce compartimentul se micşorează tot mai mult, rămâne din ce în ce mai puţin spaţiu în care câmpul gravitaţional poate varia, şi prin urmare principiul echivalenţei se aplică din ce în ce mai bine. În limbaj tehnic, diferenţa dintre un câmp gravitaţional uniform, simulat de o mişcare accelerată, şi un câmp gravitaţional „real", posibil neuniform, creat de nişte corpuri masive, este cunoscută sub numele de câmp gravitaţional „fluctuant" (şi este similar cu câmpul creat de Lună pe Pământ, răspunzător de producerea mareelor). Prin urmare, această notă poate fi rezumată spunând că pe măsură ce compartimentul în care vă aflaţi devine mai mic, câmpurile gravitaţionale fluctuante devin din ce în ce mai greu de observat, în felul acesta mişcarea accelerată şi câmpul gravitaţional „real" devenind indiscernabile.

14 Albert Einstein, citat de Albrecht Fölsing, *Albert Einstein* (New York: Viking, 1997), pagina 315.

15 John Stachel, „Einstein şi discul rigid în rotaţie" în *General Relativity and Gravitation*, ed. A. Held (New York Plenum, 1980), p. 1.

16 Analiza mişcării cu Tornada, sau „discul rotativ rigid", cum este el numit într-un limbaj mai tehnic, poate conduce la confuzie. De fapt, nici până în ziua de azi nu există un punct de vedere comun privind anumite aspecte subtile ale acestui exemplu. În text am urmat spiritul analizei făcute de Einstein însuşi, ceea ce vom face şi în această notă în care încercăm să lămurim două aspecte. Mai întâi poate aţi fost surprinşi că lungimea cercului nu suferă o contracţie Lorentz, aşa cum suferă rigla, astfel încât până la urmă Slim să măsoare aceeaşi distanţă cu cea măsurată de noi la început. Trebuie să vă amintiţi însă că platforma se roteşte mereu. Nu am avut niciodată ocazia s-o măsurăm în repaus. Prin urmare, din perspectiva noastră de observatori staţionari, singura diferenţă dintre măsurătoarea noastră şi cea a lui Slim este aceea că rigla lui este contractată Lorentz; discul se învârtea când noi făceam măsurătorile şi se învârte şi când îl urmărim pe Slim făcând măsurătorile lui. Deoarece vedem că rigla lui este contractată, ne dăm seama că el va trebui s-o aşeze de mai

multe ori de-a lungul circumferinței pentru a parcurge cercul complet. Prin urmare, el va măsura o lungime mai mare decât noi. Contracția Lorentz a circumferinței ar fi fost relevantă în cazul unei comparații între discul în repaus și discul în mișcare, dar o asemenea comparație nu e necesară aici.

În al doilea rând, v-ați putea întreba ce s-ar întâmpla când discul ar încetini până la oprire. Acum se pare că trebuie să luăm în considerare modificarea circumferinței la modificarea vitezei, datorită diferitelor grade de contractare Lorentz. Dar cum se împacă asta cu valoarea constantă a razei? Aceasta e o problemă subtilă a cărei rezolvare se bazează pe faptul că nu există *obiecte perfect rigide* în lumea reală. Obiectele se pot deforma, adaptându-se astfel alungirii sau contractării impuse de noi; altminteri, așa cum a atras atenția Einstein, un disc rotativ care s-a format inițial lăsând metalul topit să se întărească în timp ce se rotea s-ar rupe în urma schimbării ritmului de rotație. Pentru mai multe informații despre discul rotativ, vezi Stachel, „Einstein and the Rigidly Rotating Disk".

17 Cititorul avizat va observa că în exemplul discului rotativ, adică într-un sistem de referință în mișcare de rotație uniformă, curbarea celor trei dimensiuni ale spațiului se combină în spațiul-timp 4-dimensional a cărui curbură se anulează.

18 Herman Minkovski, citat de Fölsing în *Albert Einstein*, p. 189.

19 Interviu cu John Wheeler, 27 ianuarie, 1998.

20 Ceasurile atomice existente sunt suficient de precise pentru a detecta deformări atât de mici – chiar și mai mici – ale timpului. De exemplu, în 1976, Robert Vessot și Martin Levine de la Observatorul Astronomic Harvard-Smithonian, împreună cu colaboratorii lor de la NASA, au lansat o rachetă Scout D de pe insula Wallops, Virginia, care purta un ceas atomic având o precizie egală cu o miime de miliardime de secundă pe oră. Ei sperau să arate că pe măsură ce racheta câștiga altitudine (deci pe măsură ce atracția gravitațională a Pământului scădea), un ceas atomic identic aflat pe Pământ (deci sub influența întregii forțe gravitaționale) va ticăi mai rar. Printr-un fascicul de microunde, cercetătorii puteau compara ritmul ticăiturilor celor două ceasuri și, într-adevăr, la altitudinea maximă de 6 000 de mile a rachetei, ceasul atomic montat pe ea ticăia mai repede cu aproximativ patru părți la un miliard față de omologul lui de pe Pământ, confirmând predicția teoretică cu o eroare relativă de a suta parte dintr-un procent.

21 Pe la mijlocul secolului XIX, savantul francez Urbain Jean Joseph Le Verrier a descoperit că planeta Mercur deviază ușor de la orbita sa în jurul Soarelui, prezisă de teoria lui Newton. Timp de mai mult de o jumătate de secol, s-au căutat tot felul de explicații pentru această așa-numită precesie a periheliului orbitei (în limbaj simplu, la sfârșitul fiecărei orbite, Mercur nu se află exact acolo unde prevede teoria lui – influența gravitațională a unei planete necunoscute sau a unui inel planetar, un satelit încă nedescoperit, efectul prafului interplanetar, turtirea Soarelui – dar nici una nu a convins. În 1915 Einstein

a calculat precesia periheliului planetei Mercur folosind nou-descoperitele ecuații ale teoriei generale a relativității, iar răspunsul găsit, așa cum el însuși spunea, i-a dat palpitații: rezultatele relativității generale se potriveau exact cu observațiile experimentale. Acest succes l-a făcut pe Einstein să aibă mare încredere în teoria sa, dar aproape toți ceilalți așteptau confirmarea unei *predicții*, nu explicarea unei anomalii cunoscute. Mai multe detalii găsiți în Abraham Pais, *Subtle Is the Lord* (New York: Oxford University Press, 1982), p. 39.

22 Robert P. Crease și Charles C. Mann, *The Second Creation* (New Brunswick, N.J.: Rutgers University Press, 1996), p. 39.

23 Surprinzător, cercetări recente privind ritmul de expansiune a cosmosului indică faptul că universul ar putea încorpora o constantă cosmologică mică, dar diferită de zero.

24 Richard Feynman în *The Character of Physical Law* (Cambridge, Mass.: MIT Press, 1965), p. 129.

25 Deși lucrarea lui Planck a rezolvat dilema energiei infinite, se pare că nu acesta a fost scopul lui. Planck încerca să rezolve o altă problemă, strâns legată de aceasta: rezultatele experimentale privind modul în care energia dintr-un cuptor încins – un „corp negru", ca să fim mai preciși – este distribuită după lungimile de undă ale radiației. Pentru mai multe detalii despre istoria acestor descoperiri, cititorul poate consulta cartea lui Thomas S. Kuhn, *Black-body Theory and the Quantum Discontinuity, 1894-1912* (Oxford, Anglia: Clarendon, 1978).

26 Mai exact, Planck a arătat că undele al căror conținut minim de energie depășește contribuția medie la energia totală (conform termodinamicii secolului XIX) sunt suprimate exponențial. Această suprimare este din ce în ce mai puternică pe măsură ce examinăm unde cu frecvențe mai mari.

27 Constanta lui Planck este de $1{,}05\times10^{-27}$ grame-centimetru/secundă.

28 Timothy Ferris, *Comming of Age in the Milky Way* (New York: Anchor, 1989), p. 286.

29 Steven Hawking, prelegere la Simpozionul de la Amsterdam despre Gravitație, găuri negre și teoria corzilor, 21 iunie, 1997.

30 Merită să menționăm ca abordarea lui Feynman poate fi folosită pentru a deduce abordarea bazată pe metoda funcțiilor de undă și viceversa; prin urmare, cele două abordări sunt perfect echivalente. Conceptele, limbajul și interpretarea folosite de cele două metode sunt însă destul de diferite, chiar dacă răspunsurile obținute sunt absolut identice.

31 Richard Feynman, *QED: The Strange Theory of Light and Matter* (Princeton: Princeton University Press, 1988).

32 Steven Hawking, *A Brief History of Time* (New York: Bantam Books, 1988), p. 175.

33 Richard Feynman, citat în Timothy Ferris, *The Whole Shebang* (New York: Simon & Schuster, 1997), p. 97.

34 Dacă sunteți în continuare nedumeriți de faptul că se poate întâmpla ceva într-o regiune de spațiu goală, este important de remarcat că principiul de incertitudine modifică ideea noastră de spațiu gol. De exemplu, când este aplicat fluctuațiilor undelor unui câmp (cum ar fi propagarea undelor electromagnetice în câmp electromagnetic), principiul de incertitudine ne arată că amplitudinea undei și viteza cu care ea se modifică sunt legate printr-o relație de proporționalitate inversă asemănătoare cu cea care leagă poziția de viteza particulei: cu cât este specificată mai precis amplitudinea, cu atât cunoaștem mai puțin precis viteza cu care ea se modifică. Când spunem că o regiune a spațiului este goală, pe lângă altele, mai spunem și că nu există unde care s-o străbată, deci toate câmpurile sunt zero. Putem reformula spunând că amplitudinile tuturor undelor care trec prin acea regiune sunt exact zero. Dar dacă cunoaștem cu precizie amplitudinile, principiul de incertitudine implică faptul că rata de modificare a amplitudinii este complet necunoscută, deci poate lua orice valoare. Dar dacă amplitudinea se schimbă, asta înseamnă că în momentul următor valoarea ei *nu va mai fi zero*, deși regiunea de spațiu despre care vorbim este în continuare „goală". Din nou, în medie câmpul va fi zero, din moment ce în unele zone valoarea lui va fi pozitivă, iar în altele negativă; în medie, energia netă în regiune nu se schimbă. Incertitudinea cuantică implică faptul că energia câmpului – chiar și într-o regiune goală a spațiului – fluctuează în sus și în jos, astfel încât mărimea fluctuațiilor devine mai mare pe măsură ce distanțele și scara de timp la care regiunea este observată sunt mai mici. Atunci, energia înmagazinată în astfel de fluctuații instantanee ale câmpului, prin relația $E=mc^2$, poate fi convertită în creare de perechi particulă-antiparticulă, care apoi se anihilează rapid pentru a păstra energia medie la valoarea zero.

35 Chiar dacă ecuația pe care Schrödinger a scris-o inițial – cea care încorpora și relativitatea specială – nu descria cu acuratețe proprietățile electronilor din atomul de hidrogen, la scurt timp s-a observat că este o ecuație utilă când e folosită corect în alte contexte și, de fapt, se mai folosește și astăzi. În orice caz, când Schrödinger a publicat ecuația sa, a fost devansat de Oskar Klein și Walter Gordon, așa că ecuația sa se numește acum „ecuația Klein-Gordon".

36 Pentru cititorul cu înclinații matematice menționăm că principiile de simetrie folosite în fizica particulelor elementare sunt în general bazate pe grupuri, și în mod special pe grupuri Lie. Particulele elementare sunt în general aranjate în reprezentări ale diferitelor grupuri, iar ecuațiile care guvernează evoluția lor în timp trebuie să respecte transformările de simetrie asociate. Pentru forța tare, aceste simetrii se numesc SU(3) (analogul rotațiilor obișnuite din spațiul tridimensional, dar acționând într-un spațiu complex), iar cele trei culori ale unei specii de cuarci se transformă într-o reprezentare tridimensională. Schimbarea (de la roșu, verde, albastru la galben, indigo, violet) menționată

în text este, mai precis, o transformare SU(3) acționând pe „coordonatele de culoare" ale cuarcului. O simetrie de etalonare este o simetrie în care transformările de grup pot avea o dependență spațio-temporală: în cazul de față, „rotind" culorile cuarcului în mod diferit la diferite poziții în spațiu și la diferite momente de timp.

37 În cursul dezvoltării teoriilor cuantice ale celor trei forțe negravitaționale, fizicienii au fost confruntați cu asemenea calcule care dădeau rezultate infinite. Cu timpul, ei și-au dat însă seama că acestea se pot înlătura printr-un procedeu numit *renormare*. Infiniților care apar însă la încercarea de a combina teoria generală a relativității cu mecanica cuantică nu li se poate aplica renormarea. Recent, fizicienii și-au dat seama că rezultatele infinite sunt un semnal că o teorie este folosită dincolo de limitele ei de aplicabilitate. Cum noi încercăm să găsim o teorie al cărui domeniu de aplicabilitate să fie, în principiu, nelimitat – teoria ultimă sau finală –, fizicienii încearcă să găsească o teorie care să nu producă rezultate infinite, oricât de exotice ar fi sistemele fizice pe care le analizează.

38 Valoarea lungimii Planck poate fi înțeleasă pe baza unor raționamente simple care își au rădăcina în ceea ce fizicienii numesc *analiză dimensională*. Ideea e următoarea. Când o teorie este formulată ca un set de ecuații, simbolurile abstracte trebuie să fie legate de caracteristicile fizice ale lumii dacă teoria are legătură cu realitatea. În particular, trebuie să introducem un sistem de unități astfel încât, dacă un simbol se referă de pildă la o lungime, să avem o scară pe baza căreia valoarea lui poate fi interpretată. Prin urmare, dacă ecuațiile arată că lungimea în cauză este 5, noi trebuie să știm dacă aceasta înseamnă 5 centimetri, 5 kilometri, 5 ani-lumină etc. Într-o teorie care implică relativitatea generală și mecanica cuantică, o alegere a unităților apare în mod natural în modul următor. Există două constante ale naturii de care depinde relativitatea generală: viteza luminii, c, și constanta gravitațională a lui Newton, G. Mecanica cuantică depinde de o singură constantă a naturii, $\hbar$. Examinând unitățile acestor constante (de exemplu c este o viteză, deci este exprimată ca distanță împărțită la timp etc.) observăm că $\sqrt{\hbar G / c^3}$ are unitățile unei lungimi; de fapt este 1.616×10^{-33} centimetri. Aceasta este lungimea Planck. Deoarece implică date de intrare gravitaționale și spațio-temporale (G și c) și are de asemenea și o dependență cuantică ($\hbar$), ea precizează scara de măsură – unitatea naturală de lungime – pentru orice teorie care încearcă să unifice relativitatea generală și mecanica cuantică. Când însă folosim în text termenul de „lungime Planck", o facem de cele mai multe ori numai într-un sens aproximativ, indicând o lungime care poate diferi de 10^{-33} centimetri prin doar câteva ordine de mărime.

39 În momentul de față, pe lângă teoria corzilor, există și alte două abordări pentru a uni gravitația cu mecanica cuantică. Una dintre ele îl are în prim-plan pe Roger Penrose de la Universitatea Oxford și este cunoscută sub numele de *teoria twistorilor*. Cealaltă – inspirată în parte de teoria lui Penrose – îl are

în prim-plan pe Abhay Ashtekar de la Universitatea de Stat din Pennsylvania şi este cunoscută sub numele de *metoda variabilelor noi*. Deşi aceste abordări nu vor fi prezentate aici, s-ar părea că există o legătură profundă între ele şi teoria corzilor şi că probabil, împreună cu teoria corzilor, toate cele trei abordări conduc la aceeaşi soluţie de unificare a relativităţii generale cu mecanica cuantică.

40 Cititorul avizat îşi va da seama că în acest capitol ne concentrăm numai asupra teoriei *perturbative* a corzilor; aspectele neperturbative sunt prezentate în capitolele 12 şi 13.

41 Interviu cu John Schwartz, 23 decembrie 1997.

42 Propuneri similare au fost făcute în mod independent de Tamiaki Yoneya şi de Korkut Bardakci şi Martin Halpern. Fizicianul suedez Lars Brink a avut de asemenea contribuţii semnificative la dezvoltarea iniţială a teoriei corzilor.

43 Interviu cu John Schwartz, 23 decembrie 1997.

44 Interviu cu Michael Green, 20 decembrie 1997.

45 Modelul standard sugerează un mecanism prin care particulele capătă masă – mecanismul Higgs, după numele fizicianului scoţian Peter Higgs. Dar în ce priveşte explicarea maselor particulelor, acesta doar transferă sarcina, punând-o pe seama explicării proprietăţilor unei ipotetice „particule generatoare de masă" – aşa-numitul boson Higgs. Experimente pentru găsirea lui sunt în curs de desfăşurare, dar, chiar dacă este găsit şi proprietăţile lui sunt măsurate, acestea vor fi date de intrare pentru modelul standard, pe care teoria nu le explică.

46 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice să remarcăm că asocierea dintre un mod de vibraţie al corzii şi sarcinile de forţă poate fi descrisă mai precis după cum urmează. Când mişcarea unei corzi este cuantificată, stările ei posibile de vibraţie sunt reprezentate prin vectori în spaţiul Hilbert, la fel cum se face pentru orice sistem cuantic. Aceşti vectori pot fi indexaţi după valorile proprii corespunzătoare unui set comutativ de operatori hermitici. Printre aceşti operatori se numără hamiltonianul, ale cărui valori proprii dau energia, deci şi masa stării de vibraţie, precum şi operatori care generează diversele simetrii de etalonare pe care le respectă teoria. Valorile proprii ale acestor din urmă operatori dau sarcinile de forţă asociate cu starea de vibraţie a corzii.

47 Bazându-se pe observaţii culese de pe urma celei de-a doua revoluţii a supercorzilor (prezentate în capitolul 12), Witten şi mai ales Joe Lykken de la Fermi National Accelerator Laboratory au identificat o posibilă fisură subtilă în această concluzie. Lykken a sugerat că ar fi cu putinţă ca tensiunea din corzi să fie de fapt mult mai mică, şi prin urmare dimensiunea lor să fie mult mai mare decât s-a crezut la început. Atât de mare, încât corzile ar putea fi observate de următoarea generaţie de acceleratoare de particule. Dacă această posibilitate fenomenală se va adeveri, există şansa ca multe din implicaţiile remarcabile ale teoriei corzilor prezentate în capitolul acesta şi în următoarele să fie

verificate experimental în cursul următorului deceniu. Dar, chiar şi în scenariul mai „convenţional“, în care corzile au lungimi de ordinul a 10^{-33} centimetri, există metode indirecte de a le căuta, despre care vom vorbi în capitolul 9.

48 Cititorul avizat îşi va da seama că fotonul produs într-o ciocnire dintre un electron şi un pozitron este un foton virtual şi prin urmare trebuie să-şi elibereze energia în scurt timp, disociindu-se într-o pereche particulă-antiparticulă.

49 Aparatul funcţionează colectând fotonii ce s-au ciocnit de obiectul care ne interesează şi înregistrându-i pe un film fotografic. Modul în care ne folosim aici de cameră este simbolic, din moment ce noi nu formăm imaginea folosind fotoni împrăştiaţi de corzile care se ciocnesc. Pur şi simplu înregistrăm în figura 6.7 (c) întreaga istorie a interacţiunii. Spunând acestea, ar trebui să scoatem în evidenţă încă un aspect subtil. Am aflat în capitolul 4 că putem formula mecanica cuantică folosind metoda lui Feynmann de însumare a traiectoriilor în care analizăm mişcarea obiectelor combinând contribuţiile *tuturor* traiectoriilor posibile ce duc de la un punct iniţial ales la un punct final ales (fiecare traiectorie contribuind cu o pondere statistică determinată de Feynmann). În figurile 6.6 şi 6.7 e prezentată *una* din numărul infinit de traiectorii posibile urmate de particula punctiformă (figura 6.6) sau de coardă (figura 6.7) de-a lungul căreia acestea se deplasează de la poziţia iniţială la poziţia finală. Oricum, discuţia din această secţiune se aplică la fel de bine oricărei alte traiectorii posibile şi prin urmare se aplică întregului proces cuantic. (Formularea mecanicii cuantice a particulelor punctiforme dată de Feynmann în formalismul integralei după traiectori a fost generalizată în teoria corzilor prin lucrările lui Stanley Mandelstam de la Universitatea din Berkley, California, şi de fizicianul rus Alexander Poliakov, care este acum la Departamentul de Fizică al Universităţii Princeton.)

50 Albert Einstein, citat de R. Clarc în *Einstein: The Life and Times* (New York: Avon Books, 1984), p. 287.

51 Mai exact, spin ½ înseamnă ca momentul cinetic al electronului datorat spinului este ?/2.

52 Descoperirea şi dezvoltarea supersimetriei are o istorie complicată. Pe lângă cei citaţi în text, contribuţii esenţiale la început au mai adus R. Haag, M. Sohnius, J. T. Lopuszanski, Y. A. Gol'fand, E. P. Lichtmanm, J. L. Gervais, B. Sakita, V. P. Akulov, D. V. Volkov şi V. A. Soroka. Parte din această muncă a lor este prezentată de Rosanne Di Stefano, *Notes on the Conceptual Development of Supersymmetry*, Institutul de Fizică Teoretică, Universitatea de Stat din New York, preprintul ITP-SB-8878.

53 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm că această extensie implică lărgirea sistemului spaţio-temporal de coordonate carteziene cu coordonate cuantice noi, de pildă u şi v, care anticomută: $u \times v = -v \times u$. Atunci supersimetria poate fi înţeleasă ca o translaţie în acest spaţiu-timp cuantic lărgit.

54 Pentru cititorul care vrea să afle mai multe detalii legate de aceste aspecte tehnice facem următoarele remarci. În nota 45 am menţionat că modelul standard invocă o „particulă generatoare de masă" – bosonul Higgs – pentru a furniza particulelor din tabelele 1.1 şi 1.2 masele observate. Pentru ca această procedură să funcţioneze, masa particulei Higgs nu poate fi prea mare; există studii care au arătat că masa ei nu trebuie să fie mai mare de aproximativ 1 000 de ori masa protonului. Dar se pare că fluctuaţiile cuantice tind să contribuie substanţial la masa acestei particule, împingând-o eventual până la scara de mase Planck. Totuşi, teoreticienii au descoperit că această concluzie, care ar pune în evidenţă un defect major al modelului standard, poate fi evitată dacă anumiţi parametri ai modelului (cel mai important, masa liberă a bosonului Higgs) sunt ajustaţi cu o precizie mai bună 1 la 10^{15} pentru a anula efectele acestor fluctuaţii cuantice asupra masei particulei Higgs.

55 O remarcă subtilă pe care trebuie s-o facem în legătură cu figura 7.1 este că intensitatea forţei slabe este prezentată ca fiind între cea a forţei tari şi cea a forţei electromagnetice, deşi am afirmat anterior că este mai slabă decât amândouă. Motivul se găseşte în tabelul 1.2, unde vedem că particulele mesager ale forţei slabe sunt destul de masive, în timp ce cele ale forţelor electromagnetică şi tare au masă nulă. Intrinsec, intensitatea forţei slabe (măsurată prin constanţa de cuplaj – o noţiune pe care o vom întâlni în capitolul 12) – este cea din figura 7.1, dar masivele sale particule mesager transportă cu greu influenţa acesteia şi îi diminuează efectele. În capitolul 14 vom vedea cum putem include în figura 7.1 şi forţa gravitaţională.

56 Edward Witten, prelegere în cadrul Seriei de conferinţe în memoria lui Heinz Pagels, Aspen, Colorado, 1997.

57 Pentru o analiză mai aprofundată a acestor idei şi a altora similare, vezi cartea lui Steven Weinberg, *Dreams of a Final Theory*.

58 Aceasta este o idee simplă, dar deoarece imprecizia limbajului obişnuit ne poate induce în eroare, se cuvin făcute două remarci lămuritoare. Prima este că furnica e constrânsă să trăiască pe *suprafaţa* furtunului. Dacă furnica ar putea săpa în interiorul furtunului – dacă ar putea penetra în cauciucul furtunului – atunci ar fi necesare trei numere pentru a-i preciza poziţia, deoarece ar trebui să specificăm şi cât de adânc a săpat furnica. Dar dacă furnica trăieşte numai pe suprafaţă, atunci poziţia ei este determinată de două numere. Aceasta ne conduce la cea de-a doua remarcă. Chiar dacă furnica ar trăi numai pe suprafaţă, noi i-am putea preciza poziţia şi cu ajutorul a trei numere: obişnuitele poziţii stânga-dreapta, înainte-înapoi, şi sus-jos cu care ne-am familiarizat din spaţiul nostru tridimensional. Dar din moment ce ştim că furnica trăieşte pe suprafaţa furtunului, cele două numere la care ne-am referit mai sus ne dau datele minimale care pot specifica în mod unic poziţia furnicii. Asta este ceea ce înţelegem când spunem ca suprafaţa furtunului este bidimensională.

59 În mod surprinzător, fizicienii Savas Dimopoulos, Nima Arkani-Hamed şi Gia Dvali, pornind de la idei mai vechi ale lui Ignatios Antoniadis şi Joseph

Lykken, au arătat că până şi o dimensiune suplimentară mare de un milimetru s-ar putea să nu fie încă detectată experimental. Motivul este că acceleratoarele de particule sondează microcosmosul exploatând forțele slabă, tare şi electromagnetică. Forța gravitațională, fiind extrem de slabă la energiile accesibile, este în general ignorată. Dar Dimopoulos şi colaboratorii săi au remarcat că dacă dimensiunea suplimentară încolăcită are impact în mod special asupra forței gravitaționale (lucru care devine plauzibil din perspectiva teoriei corzilor), toate experimentele existente ar fi putut-o ignora. Experimente noi, foarte sensibile la interacția gravitațională, vor căuta dimensiuni încolăcite mari în viitorul apropiat. Un rezultat pozitiv ar reprezenta una dintre cele mai mari descoperiri ale tuturor timpurilor.

60 Edwin Abbott, *Flatland* (Princeton: Princeton University Press, 1991).

61 A. Einstein într-o scrisoare către Kaluza, citată de Abraham Pais în *Subtle Is the Lord: The Science and the Life of Albert Einstein* (Oxford: Oxford University Press, 1982), p. 330.

62 A. Einstein într-o scrisoare către Kaluza, citată de D. Freedman şi P. van Nieuwenhuizen, „The Hidden Dimensions of Spacetime“, *Scientific American*, vol 252 (1985), p. 62.

63 *Ibidem.*

64 Fizicienii au descoperit că trăsătura modelului standard cel mai greu de încorporat într-o teorie cu mai multe dimensiuni este cea care poartă numele de *chiralitate*. Pentru a nu complica prezentarea, nu am vorbit despre această noțiune în textul principal, dar o vom prezenta pe scurt aici pentru cititorul interesat. Imaginați-vă că cineva vă arată filmul unui anume experiment, după care vă provoacă să spuneți dacă experimentul a fost filmat direct sau a fost filmată reflexia acestuia într-o oglindă. Cum cineastul e un expert, nu a lăsat să se strecoare în film nici un fel de indicii care să trădeze prezența oglinzii. Este aceasta o provocare pe care poate fi acceptată? La mijlocul anilor 1950, ideile teoretice ale lui T. D. Lee şi C. N. Yang şi rezultatele experimentale ale lui C. S. Wu au arătat că se poate răspunde acestei provocări dacă a fost filmat experimentul potrivit. Mai exact, ei au arătat că legile universului nu sunt perfect simetrice la reflexia în oglinda, în sensul că versiunea reflectată în oglindă a anumitor procese – acele procese care depind în mod direct de forța slabă – *nu pot avea loc în lumea reală*, chiar dacă procesul inițial există. Aşa încât, dacă urmărind filmul vedeți că are loc unul din aceste procese interzise, ştiți că urmăriți de fapt reflexia în oglindă a experimentului. Din moment ce oglinzile schimbă stânga cu dreapta, cercetările lui Yang, Lee şi Wu au arătat că universul nu este perfect simetric stânga-dreapta – în limbajul de specialitate, universul este *chiral*. Aceasta este trăsătura modelului standard (a forței slabe, în particular) pe care fizicienii au găsit-o aproape imposibil de încorporat în formalismul supergravitației în mai multe dimensiuni. Pentru a evita confuzia, să observăm că în capitolul 10 vom vorbi despre un concept

din teoria corzilor numit „simetria în oglindă“, dar folosirea termenului de „oglindă“ în acel context este complet diferită de cea de aici.

65 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice, menţionăm că o varietate Calabi-Yau este o varietate complexă Kähler cu prima clasă Chern nulă. În 1957 Calabi a enunţat conjectura că orice varietate de acest gen admite o metrică Ricci plată, iar în 1977, Yau a demonstrat această conjectură.

66 Această ilustraţie a fost obţinută prin amabilitatea lui Andrew Hanson de la Universitatea Indiana şi a fost realizată folosind pachetul grafic *Mathematica* 3-D.

67 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm ca acest spaţiu Calabi-Yau este o secţiune reală tridimensională prin hipersuprafaţa cvintică din spaţiul proiectiv complex cvadridimensional.

68 Edward Witten, „Reflections on the Fate of Spacetime“, *Physics Today*, aprilie 1996, p. 24.

69 Interviu cu Edward Witten, 11 mai 1998.

70 Sheldon Glashow şi Paul Ginsparg, „Desperately Seeking Superstrings?“, *Physics Today*, mai 1998, p. 7.

71 Sheldon Glashow, în *The Superworld I*, editor A. Zichichi (New York: Plenum, 1990), p. 250.

72 Sheldon Glashow, *Interactions* (New York: Warner Books, 1988), p. 335.

73 Richard Feynmann în *Superstrings: A Theory of Everything?* editori Paul Davies şi Julian Brown (Cambridge, Anglia: Cambridge University Press, 1988).

74 Howard Georgi, în *The New Physics*, editor Paul Davies (Cambridge: Cambridge University Press 1989), p. 446.

75 Interviu cu Edward Witten, 4 martie 1998.

76 Interviu cu Cumrun Vafa, 12 ianuarie 1998.

77 Murray Gell-Mann, citat în *The Second Creation* de Robert P. Crease şi Charles C. Mann (New Burnswick, N.J.: Rutgers University Press), 1996, p. 414.

78 Interviu cu Sheldon Glashow, 28 decembrie, 1997.

79 Interviu cu Sheldon Glashow, 28 decembrie, 1997.

80 Interviu cu Howard Georgi, 28 decembrie, 1997. Pe parcursul interviului, Georgi a mai remarcat că invalidarea experimentală a dezintegrării protonului, care reieşea din prima teorie despre tot propusă de el şi Glashow (vezi capitolul 7) a jucat un rol important în refuzul lui de a accepta teoria supercorzilor. El a amintit că teoria marii unificări pe care o propusese invoca un domeniu de energii cu mult mai înalte decât orice altă teorie considerată anterior, iar când predicţiile ei au fost infirmate când a rezultat că a fost „pălmuit de natură“ atitudinea lui faţă de studiul fizicii energiilor extrem de înalte s-a schimbat brusc. Când l-am întrebat dacă confirmarea experimentală a teoriei sale l-ar fi îndemnat să se îndrepte spre scara Planck, el a răspuns: „Probabil că da.“

81 David Cross, „Superstrings and Unification“, în *Proceedings of the XXIV International Conference on High Energy Physics,* editori R. Kotthaus şi J. Kühn (Berlin: Springer-Verlag, 1988), p. 329.

82 Spunând acestea, trebuie să avem în vedere posibilitatea menţionată în nota 47, conform căreia corzile ar putea fi mult mai lungi decât s-a crezut la început şi prin urmare ar putea fi direct observabile experimental de acceleratoare care ar fi construite în următoarele decenii.

83 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm că numărul de familii este jumătate din valoarea absolută a numărului lui Euler al spaţiului Calabi-Yau. Numărul lui Euler este suma alternată a dimensiunilor grupurilor de omologie ale varietăţii – aceasta din urmă fiind cea la care ne referim în sens vag prin găuri multidimensionale. Prin urmare, trei familii apar din spaţii Calabi-Yau pentru care numărul lui Euler este egal cu ±6.

84 Interviu cu John Schwarz, 23 decembrie, 1997.

85 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm că ne referim la varietăţi Calabi-Yau cu grup fundamental finit, netrivial, al cărui ordin, în anumite cazuri, determină numitorul sarcinilor fracţionare.

86 Interviu cu Edward Witten, 4 martie, 1998.

87 Pentru cei avizaţi menţionăm că unele din aceste procese violează conservarea numărului leptonic, precum şi conservarea simetriei la inversiunea sarcină-paritate-timp (*charge-parity-time – CPT – inversion*).

88 Pentru completitudine menţionăm că, deşi aproape tot ce am discutat până acum în carte se aplică la fel de bine şi corzilor deschise (cu capete libere) şi corzilor închise, sub formă de bucle (corzile asupra cărora ne-am concentrat până acum), în cadrul temei discutate aici, cele două tipuri de corzi apar cu proprietăţi diferite. La urma urmelor, o coardă deschisă nu poate fi înfăşurată în jurul dimensiunii circulare. Dar, în studii care aveau să joace un rol important în cea de-a doua revoluţie a supercorzilor, în 1989, Joe Polchinski de la Universitatea din Santa Barbara, California, şi doi dintre studenţii săi, Jian-Hui Dai şi Robert Leigh, au arătat că concluziile acestui capitol se potrivesc perfect şi corzilor deschise.

89 Dacă vă întrebaţi de ce energiile posibile de vibraţie uniformă sunt multiplii întregi de $1/R$, trebuie doar să vă amintiţi discuţia despre mecanica cuantică din capitolul 4. Acolo am arătat că energia, ca şi banii, vine în pachete discrete: multipli întregi ai diverselor unităţi de energie. În cazul vibraţiilor uniforme din universul furtunului, această unitate de energie este exact $1/R$, aşa cum am demonstrat în text folosind principiul de nedeterminare. Prin urmare, energiile de vibraţie uniformă sunt multipli întregi de $1/R$.

90 Matematic, relaţia dintre energiile corzii într-un univers cu o dimensiune circulară a cărei rază este R sau $1/R$ apare din formula energiei, $v/R+wR$, unde v este numărul de vibraţie şi w este numărul de înfăşurări. Această ecuaţie este

invariantă la schimbarea simultană a lui v cu w şi a lui R cu $1/R$ – adică la schimbarea numerelor de vibraţie şi de înfăşurare şi la inversarea razei. În discuţia noastră lucrăm cu unităţi Planck, dar putem de asemenea lucra cu unităţi mai convenabile rescriind formula energiei în funcţie de $\sqrt{\alpha'}$ – aşa-numita scară a corzilor – a cărei valoare este în jurul lungimii Planck, adică 10^{-33} centimetri. Putem apoi exprima energiile corzilor ca $v/R+wR/\alpha'$, care este de asemenea invariant la schimbarea lui v cu w şi a lui R cu α'/R, unde ultimele două sunt exprimate în unitatea convenţională de distanţă.

91 V-aţi putea întreba cum e posibil ca o coardă care înconjoară o dimensiune circulară de rază R să măsoare totuşi raza ca fiind $1/R$. Deşi nedumerirea ar fi perfect justificată, răspunsul se găseşte de fapt chiar în formularea imprecisă a întrebării. Când spunem că o coardă înconjoară un cerc de rază R, invocăm în mod necesar o definiţie a distanţei (astfel încât expresia „raza R" are un sens). Dar *această* definiţie a distanţei este relevantă pentru modurile neînfăşurate – adică modurile de vibraţie. Din punctul de vedere al acestei definiţii a distanţei – şi numai al acestei definiţii – configuraţia înfăşurată apare ca înconjurând partea circulară a spaţiului. Pe de altă parte, din cea de-a doua definiţie a distanţei, cea care este legată de configuraţiile de înfăşurare, acestea sunt localizate în spaţiu la fel de bine cum sunt localizate modurile de vibraţie din punctul de vedere al primei definiţii a distanţei, din moment ce raza pe care acestea o „văd" este $1/R$, după cum am arătat în text.

Această descriere ne explică de ce corzile înfăşurate şi cele neînfăşurate măsoară distanţe care sunt în relaţie de proporţionalitate inversă. Dar cum ideea este destul de subtilă, probabil că merită să menţionăm pentru cititorul cu înclinaţii matematice analiza tehnică ce se află în spatele ei. În mecanica cuantică obişnuită, care implică particule punctiforme, distanţa şi impulsul (adică, esenţialmente energia) sunt legate prin transformata Fourier. Altfel spus, o stare proprie a poziţiei $|x>$ pe un cerc de rază R poate fi definită prin $|x>=\Sigma_v e^{ixp}|p>$, unde $p=v/R$, iar $|p>$ este o funcţie proprie a impulsului (analogul direct a ceea ce am numit mod de vibraţie uniformă a unei corzi – mişcarea de ansamblu, fară schimbarea formei). Totuşi, în teoria corzilor există şi o a doua noţiune de stare proprie a poziţiei, $|\tilde{x}>$, definită făcând apel la stările de înfăşurare: prin $|\tilde{x}>=\Sigma_w e^{i\tilde{x}\tilde{p}}|\tilde{p}>$, unde $|\tilde{p}>$ este starea proprie de înfăşurare, cu $\tilde{p}=wR$. Din aceste definiţii observăm imediat ca x este periodic, cu perioada $2\pi R$, în timp ce $\tilde{x}$ este periodic cu perioada $2\pi/R$, arătând în felul acesta că x este coordonata de poziţie pe un cerc de rază R, în timp ce $\tilde{x}$ este coordonata de poziţie pe un cerc de rază $1/R$. Încă şi mai explicit, ne putem imagina acum că luăm cele două pachete de undă $|x>$ şi $|\tilde{x}>$, amândouă pornind, de pildă, din origine, şi le lăsăm să evolueze în timp pentru a putea aplica operaţia prin care am definit distanţele. Raza cercului, aşa cum este măsurată ea de oricare din probe, este proporţională cu timpul care trebuie să se scurgă pentru ca pachetul să se întoarcă la configuraţia iniţială. Din moment ce o stare cu energia E evoluează cu un factor de fază care implică produsul Et, vedem că timpul scurs,

şi prin urmare raza, este $t \sim 1/E \sim R$ pentru modurile de vibraţie şi $t \sim 1/E \sim 1/R$ pentru modurile de înfăşurare.

92 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm că numărul de familii de vibraţii ale corzii este jumătate din valoarea absolută a caracteristicii Euler a spaţiului Calabi-Yau, aşa cum am mai menţionat şi în nota 83. Aceasta este dată de valoarea absolută a diferenţei dintre $h^{2,1}$ şi $h^{1,1}$, unde h^{pq} reprezintă numărul Hodge (p,q). Până la un factor aditiv, acestea ne dau numărul de trei-cicluri de omologie netriviale ("găuri tridimensionale") şi numărul două-cicluri de omologie netriviale ("găuri bidimensionale"). Astfel, în timp ce în textul principal vorbim despre numărul total de găuri, o analiză mai precisă ne arată că numărul de familii depinde de valoarea absolută a diferenţei dintre găurile de dimensiune pară şi găurile de dimensiune impară. Oricum, concluzia rămâne aceeaşi. De exemplu, dacă două spaţii Calabi-Yau diferă prin schimbarea numerelor lor Hodge $h^{2,1}$ şi $h^{1,1}$, numărul familiilor de particule – şi numărul total de „găuri" – nu se va schimba.

93 Numele vine de la faptul că „diamantele Hodge" – un rezumat matematic al găurilor de diverse dimensiuni dintr-un spaţiu Calabi-Yau – pentru ambele spaţii Calabi-Yau dintr-o pereche în oglindă sunt unul reflexia în oglindă a celuilalt.

94 Termenul de *simetrie în oglindă* mai este folosit şi în alte contexte din fizică, cu totul diferite, cum ar fi în cel legat de problema chiralităţii – adică, dacă universul nostru este simetric stânga-dreapta – aşa cum am văzut în nota 64.

95 Cititorul cu înclinaţii matematice va observa că aici ne punem de fapt problema dacă topologia spaţiului este dinamică – adică dacă se poate schimba. Observăm că deşi vom folosi des limbajul topologiei dinamice, în practică vom considera o familie uniparametrică de *spaţii-timp* a cărei topologie se schimbă în funcţie de acest parametru. Tehnic vorbind, acest parametru nu este timpul, dar în anumite limite el poate fi în principiu identificat cu timpul.

96 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice, procedura implică crearea de curbe raţionale pe un spaţiu Calabi-Yau, iar apoi folosirea faptului că, în anumite condiţii, singularitatea rezultată poate fi reparată prin rezoluţii distincte mici.

97 K. C. Cole, *New York Times Magazine*, 18 octombrie 1987, p. 20.

98 Albert Einstein, citat de John D. Barrow, *Theories of Everything*, New York: Fawcett-Columbine, 1992, p. 13.

99 Să trecem în revistă pe scurt diferenţele dintre cele cinci teorii ale corzilor. Pentru aceasta, să observăm că vibraţiile de-a lungul unei bucle se pot deplasa fie în sensul acelor de ceasornic, fie în sens invers. Corzile de Tipul IIA şi cele de Tipul IIB diferă prin aceea că în cea de-a doua teorie aceste două tipuri de vibraţii sunt identice, în timp ce în prima ele au forme exact opuse. În contextul de faţă, *opuse* are un înţeles matematic precis, dar e mai uşor să ne gândim în termeni de spini ai modurilor de vibraţie rezultate din fiecare

dintre cele două teorii. În teoria de Tipul IIB se observă că toate particulele se rotesc în aceeaşi direcţie (toate au aceeaşi chiralitate), în timp ce în teoria de Tipul IIA ele se rotesc în ambele direcţii (au ambele chiralităţi). Oricum, ambele teorii încorporează supersimetria. Cele două teorii heterotice diferă într-un mod similar, dar mai spectaculos. Fiecare din vibraţiile lor în sensul acelor de ceasornic arată la fel ca acelea ale corzilor de Tipul II (când se referă vibraţiile în sensul acelor de ceasornic, teoriile de Tipul IIA şi de Tipul IIB sunt identice), dar vibraţiile în sens invers acelor de ceasornic sunt cele ale teoriei iniţiale a corzilor bosonice. Deşi corzile bosonice sunt confruntate cu probleme insurmontabile când sunt alese atât pentru vibraţiile în sensul acelor de ceasornic, cât şi pentru vibraţiile în sens contrar acelor de ceasornic, în 1985 David Gross, Jeffrey Harvey, Emil Martinec şi Ryan Rhom (pe atunci toţi la Universitatea Princeton, porecliţi „Cvartetul de corzi de la Princeton") au arătat că rezultă o teorie perfect coerentă prin combinarea corzilor bosonice cu corzile de Tipul II. Partea cea mai ciudată a acestei combinaţii este că se ştia din lucrarea din 1971 ale lui Claude Lovelace, de la Universitatea Rutgers, şi din lucrarea din 1972 a lui Richard Brower, de la Universitatea din Boston, Peter Goddard, de la Universitatea Cambridge, şi Charles Thorn, de la Universitatea din Florida, că pentru coarda bosonică e nevoie de un spaţiu-timp 26-dimensional, în timp ce supercorzile, după cum am văzut, necesită unul 10-dimensional. Deci construcţiile de corzi heterotice sunt un hibrid straniu o *heteroză* – în care vibraţiile în sens contrar acelor de ceasornic există în 26 de dimensiuni, iar vibraţiile în sensul acelor de ceasornic există în 10 dimensiuni! Înainte de a încerca să înţelegem această uniune consternantă, trebuie spus că Gross şi colaboratorii săi au arătat că cele 16 dimensiuni suplimentare ale părţii bosonice trebuie să fie încolăcite într-una din cele două forme foarte speciale de covrig multidimensional, producând astfel teoriile Heterotic-O şi Heterotic-E. Deoarece cele 16 dimensiuni bosonice suplimentare sunt rigid încolăcite, fiecare dintre aceste teorii se comportă ca şi cum ar avea într-adevăr 10 dimensiuni, la fel ca cele de Tipul II. Din nou, ambele teorii heterotice încorporează supersimetria. În sfârşit, teoria de Tipul I este rudă apropiată cu teoria de Tipul IIB, cu singura deosebire că pe lângă buclele închise despre care am vorbit în capitolele anterioare mai are şi corzi cu capetele nelegate – aşa-numitele *corzi deschise*.

100 Când vorbim despre răspunsuri „exacte" în acest capitol, de pildă mişcarea „exactă" a Pământului, înţelegem de fapt prezicerea exactă a unor mărimi fizice *într-un anumit cadru teoretic ales*. Până când vom avea într-adevăr teoria ultimă – poate că o avem deja, poate că nu o vom avea niciodată – toate teoriile noastre vor fi aproximaţii ale realităţii. Dar această noţiune de aproximativ nu are nimic de-a face cu discuţia noastră din acest capitol. Aici ne interesează faptul că într-o teorie aleasă este de multe ori dificil, dacă nu imposibil, să extragem predicţiile exacte pe care teoria le face. În schimb,

trebuie să extragem predicții folosind metode aproximative, bazate pe abordarea perturbativă.

101 Aceste diagrame sunt versiunile din teoria corzilor a ceea poartă numele de diagrame Feynman pentru calcule perturbative în teoriile de câmp cu particule punctiforme.

102 Mai exact, orice pereche de corzi virtuale, adică orice buclă dintr-o diagramă dată, contribuie – pe lângă alți termeni mai complicați – cu un factor multiplicativ egal cu constanta de cuplaj a corzilor. Dacă această constantă de cuplaj este mai mică decât 1, înmulțiri repetate fac contribuția totală din ce în ce mai mică; dacă este 1 sau mai mare, înmulțiri repetate dau o contribuție de mărime egală sau mai mare.

103 Pentru cititorul cu înclinații matematice menționăm că ecuația arată că spațiul-timp admite o metrică Ricci plată. Dacă descompunem spațiul timp într-un produs cartezian dintre un spațiu 4-dimensional Minkovski și un spațiu compact Kähler 6-dimensional, metrica Ricci plată este echivalentă cu condiția ca acest din urmă spațiu să fie un spațiu Calabi-Yau. Iată motivul pentru care spațiile Calabi-Yau joacă un rol atât de important în teoria corzilor.

104 Evident, nimic nu ne asigură în mod absolut că aceste abordări indirecte sunt justificate. De exemplu, așa cum anumite fețe nu sunt simetrice stânga-dreapta, este *posibil* ca legile fizicii să fie diferite în alte regiuni îndepărtate ale universului, după cum vom menționa în capitolul 14.

105 Cititorul avertizat va recunoaște că aceste afirmații sunt valabile în cazul așa-numitei supersimetrii N=2.

106 Mai exact, dacă notăm constanta de cuplaj a teoriei Heterotice-O cu g_{HO} și pe cea a teoriei de Tipul I cu g_I, atunci relația dintre cele două teorii susține că ele sunt fizic identice atât timp cât $g_{HO}=1/g_I$. Când una din constantele de cuplaj este mare, cealaltă este mică.

107 Aceasta se află în strânsă analogie cu dualitatea R, $1/R$ prezentată anterior. Dacă notăm constanta de cuplaj a corzilor de Tip IIB cu g_{IIB}, atunci se pare că g_{IIB} și $1/g_{IIB}$ descriu aceeași fizică. Daca g_{IIB} este mic, atunci $1/g_{IIB}$ este mare și viceversa.

108 Dacă toate dimensiunile, cu excepția celor patru, sunt încolăcite, o teorie cu mai mult de unsprezece dimensiuni prevede existența unor particule fără masă cu spinul mai mare ca 2, posibilitate exclusă de considerații teoretice și experimentale.

109 O excepție notabilă este articolul din 1987 al lui Duff, Paul Howe, Takeo Inami și Kelly Stelle, în care se foloseau de ideile mai vechi ale lui Eric Bergshoeff, Ergin Sezgin și Townsend pentru a susține că teoria corzilor 10-dimensională ar trebui să aibă un corespondent 11-dimensional.

110 Mai precis, această diagramă ar trebui interpretată spunând că avem o singură teorie care depinde de un număr de parametri. Parametri înseamnă constante

de cuplaj, precum şi parametri de formă şi dimensiune geometrică. În principiu, ar trebui să putem folosi teoria pentru a calcula valorile particulare pe care le iau toţi aceşti parametri – o anumită valoare pentru constanta de cuplaj şi o anumită formă pentru geometria spaţio-temporală – dar la nivelul nostru de înţelegere teoretică actual nu ştim cum să facem acest lucru. Şi astfel, ca să înţeleagă teoria mai bine, teoreticienii corzilor îi studiază proprietăţile variind aceşti parametri pe întreaga gamă a posibilităţilor. Dacă valorile parametrilor sunt alese într-una din cele şase regiuni peninsulare ale figurii 12.11, teoria are proprietăţile inerente ale uneia din cele cinci teorii ale corzilor sau ale supergravitaţiei în unsprezece dimensiuni. Dacă valorile parametrilor sunt alese în regiunea centrală, fizica este guvernată de încă misterioasa teorie M.

111 Trebuie observat totuşi că şi în regiunile peninsulare există anumite căi exotice prin care branele pot avea efecte asupra fizicii obişnuite. De exemplu, s-a emis ipoteza că cele trei dimensiuni spaţiale extinse în care trăim ar fi ele însele o 3-brană mare şi nedeformată. Dacă aşa stau lucrurile, în timp ce mergem încoace şi încolo, văzându-ne de treburile noastre de zi cu zi, ne deplasăm prin interiorul unei membrane tridimensionale. În prezent se studiază asemenea posibilităţi.

112 Interviu cu Edward Witten, 11 mai, 1998.

113 Cititorul avizat îşi va da seama că prin simetria în oglindă o sferă tridimensională care colapsează într-un spaţiu Calabi-Yau este proiectată într-o sferă bidimensională în spaţiul Calabi-Yau din oglindă – aparent trimiţându-ne înapoi la situaţia inversiunilor prezentate în capitolul 11. Diferenţa e însă că o reformulare în oglindă de acest gen face ca tensorul antisimetric de câmp $B_{\mu\nu}$ – partea reală a formei Kähler complexe pe spaţiul Calabi-Yau în oglindă – să se anuleze, iar acesta este un tip de singularitate mult mai grav decât cel discutat în capitolul 11.

114 Mai exact, acestea sunt exemple de găuri negre extreme: găuri negre care au masa minimă admisă pentru sarcinile de forţă pe care le conţin, la fel ca stările BPS din capitolul 12. Găuri negre similare vor juca un rol central în discuţia despre entropia găurilor negre.

115 Radiaţia emisă de o gaură neagră ar trebui să fie exact ca aceea emisă de un cuptor încins – aceeaşi problemă discutată la începutul capitolului 4, care a jucat un rol central în dezvoltarea mecanicii cuantice.

116 S-a demonstrat că deoarece găurile negre implicate în ruperea spaţiului prin tranziţiile conice sunt extreme, ele nu produc radiaţie Hawking indiferent cât de uşoare devin.

117 Stephen Hawking, prelegere la Simpozionul de la Amsterdam despre gravitaţie, găuri negre şi corzi, 21 iunie, 1996.

118 În calculele lor inițiale, Strominger și Vafa au descoperit că matematica devenea mai ușoară dacă se lucra cu cinci – nu patru – dimensiuni spațio-temporale extinse. În mod surprinzător, după ce au terminat calculul entropiei într-o astfel de gaură neagră 5-dimensională, ei au înțeles că nici un teoretician nu construise până atunci o asemenea ipotetică gaură neagră extremă într-un cadru al relativității generale cu cinci dimensiuni. Deoarece numai comparând răspunsul lor cu aria orizontului evenimentelor unei găuri negre 5-dimensionale își puteau verifica rezultatele, Strominger și Vafa s-au apucat să construiască matematic o asemenea gaură neagră. Și au reușit. A fost apoi simplu să arate ca entropia calculată în modelul microscopic dat de teoria corzilor era în concordanță cu ceea ce Hawking ar fi prezis pornind de la aria orizontului evenimentelor găurii negre. Dar este interesant de menționat că soluția găurii negre a fost găsită mai târziu, deci Strominger și Vafa nu cunoșteau rezultatul pe care trebuiau să-l obțină când au calculat entropia. De la apariția lucrării lor însă, numeroși cercetători, între care Curtis Callan de la Princeton, au reușit să extindă calculele entropiei la situația mai familiară a celor patru dimensiuni spațio-temporale extinse, iar toate sunt în acord cu predicțiile lui Hawking.

119 Interviu cu Sheldon Glashow, 29 decembrie, 1997.

120 Laplace, *Philosophical Essay on Probabilities*, traducere de Andrew I. Dale (New York: Springer-Verlag, 1995).

121 Stephen Hawking, în Hauking și Roger Penrose, *The Nature of Space and Time* (Princeton: Princeton University Press, 1995), p. 41.

122 Stephen Hawking, prelegere la Simpozionul de la Amsterdam despre gravitație, găuri negre și corzi, 21 iunie, 1997.

123 Interviu cu Andrew Strominger, 29 decembrie, 1997.

124 Interviu cu Cumrun Vafa, 12 ianuarie 1998.

125 Stephen Hawking, prelegere la Simpozionul de la Amsterdam despre gravitație, găuri negre și corzi, 21 iunie, 1997.

126 Acest subiect are și el o legătură cu întrebarea privind pierderea informației, din moment ce unii fizicieni au emis ipoteza că ar exista un „nodul" central, ascuns în adâncurile găurii negre, care înmagazinează toată informația adusă de materia captată de orizontul evenimentelor găurii negre.

127 De fapt, tranzițiile conice cu ruptură spațială prezentate în acest capitol implică găuri negre și prin urmare par a fi legate de problema singularităților lor. Dar amintiți-vă că rupturile conice apar atunci când gaura neagră și-a cheltuit toată masa, deci acestea nu sunt direct legate de problema singularităților găurilor negre.

128 Mai exact, universul ar trebui să fie plin cu fotoni în conformitate cu radiația termică emisă de un corp perfect absorbant – un „corp negru", în limbajul termodinamicii – aflat la o anumită temperatură. Acest spectru de radiații

este acelaşi cu cel emis cuantic de găurile negre, după cum a explicat Hawking, şi de un cuptor încins, după cum a explicat Planck.

129 Această imagine e doar aproximativă, pentru că lăsăm de o parte amănunte subtile legate de mişcarea luminii într-un univers în expansiune, care afectează calculele exacte. În particular, deşi relativitatea specială afirmă că nimic nu poate călători mai repede decât lumina, aceasta nu împiedică doi fotoni, care se îndepărtează transportaţi de textura spaţiului în expansiune, să se îndepărteze unul de altul cu o viteză mai mare decât cea a luminii. De exemplu, momentul când universul a devenit transparent, la aproximativ 300 000 de ani după big bang, regiuni din spaţiu care se aflau la 900 000 de ani-lumină depărtare s-ar fi putut influenţa reciproc, deşi distanţa dintre ele depăşea 300 000 de ani-lumină. Factorul suplimentar de trei provine din expansiunea texturii spaţiale. Asta înseamnă că, pe măsură ce derulăm filmul cosmic înapoi în timp, când ajungem la 300 000 de ani după big bang două puncte din spaţiu trebuie să se afle la o distanţă mai mică de 900 000 de ani-lumină pentru a avea şanse să-şi influenţeze reciproc temperaturile. Aceste detalii numerice nu modifică aspectele calitative discutate.

130 Pentru prezentarea detaliată a descoperirii modelului cosmologic inflaţionar şi a problemelor pe care le rezolvă, vezi Alan Guth, *The Inflationary Universe* (Reading, Mass: Addison-Vesley, 1997).

131 Pentru cititorul cu înclinaţii matematice menţionăm că ideea pe care se bazează această concluzie este următoarea: dacă suma dimensiunilor spaţio-temporale ale drumurilor măturate de fiecare dintre cele două obiecte este mai mare sau egală cu dimensiunea spaţio-temporală a arenei în care se mişcă, atunci ele în principiu se vor intersecta. De exemplu, particulele punctiforme mătură drumuri spaţio-temporale unidimensionale – suma dimensiunilor spaţio-temporale ale celor două drumuri ale particulelor este deci doi. Dimensiunea spaţio-temporală a Ţării Liniare este de asemenea doi şi prin urmare drumurile lor se vor intersecta în principiu (presupunând că vitezele lor nu au fost fixate cu mare precizie la aceeaşi valoare). Similar, corzile mătură drumuri spaţio-temporale bidimensionale (foile lor de univers); pentru două corzi, suma despre care vorbim este patru. Asta înseamnă că corzile care se mişcă în patru dimensiuni spaţio-temporale (trei spaţiale şi una temporală) se vor intersecta în general.

132 Cu descoperirea teoriei M şi recunoaşterea celei de-a unsprezecea dimensiuni, teoreticienii corzilor au început să studieze moduri de înfăşurare a tuturor celor *şapte* dimensiuni suplimentare într-o manieră care le pune pe toate aproximativ pe picior de egalitate. Alegerile posibile ale acestor varietăţi 7-dimensionale sunt cunoscute sub numele de varietăţi *Joyce*, după Domenic Joyce de la Universitatea Oxford, cel care a descoperit primele tehnici pentru construcţia lor matematică.

133 Interviu cu Cumrun Vafa, 12 ianuarie 1998.

134 Cititorul avizat va observa că descrierea noastră are loc în aşa-numitul sistem de referinţă al corzii, în care creşterea curburii înainte de big bang apare din creşterea în intensitate a forţei gravitaţionale (proces datorat dilatării). În aşa-numitul sistem de referinţă einsteinian, evoluţia ar fi descrisă ca o fază de accelerare a contracţiei.

135 Interviu cu Gabriele Veneziano, 19 mai, 1998.

136 Ideile lui Smolin sunt prezentate în cartea sa, *The Life of the Cosmos* (New York: Oxford University Press, 1997).

137 În teoria corzilor, de exemplu, această evoluţie s-ar putea datora unor schimbări mici în forma dimensiunilor încolăcite care apar de la un univers la progenitura sa. Din rezultatele noastre legate de tranziţiile conice cu rupere spaţială ştim că un şir suficient de lung de asemenea schimbări mici ne poate duce de la o formă Calabi-Yau la alta, permiţând multiversului ca pe baza corzilor să încerce eficienţa reproductivă a tuturor universurilor. După ce multiversul a trecut prin suficient de multe stadii de reproducere, ipoteza lui Smolin ne-ar duce la concluzia că universul tipic ar avea o componentă Calabi-Yau optimizată pentru fertilitate.

138 Interviu cu Edward Witten, 4 martie 1998.

139 Unii teoreticieni văd un indiciu legat de această idee în *principiul holografic*, un concept introdus de Susskind şi celebrul fizician olandez Gerard't Hooft. Aşa cum o hologramă poate reproduce o imagine vizuală *tridimensională* de pe un film *bidimensional* cu o construcţie specială, Susskind şi 't Hooft au sugerat că toate evenimentele fizice pe care le întâlnim ar fi de fapt complet codificate în ecuaţii definite într-un spaţiu cu *mai puţine* dimensiuni. Deşi acest lucru pare la fel de straniu ca şi când ai încerca să desenezi portretul cuiva văzându-i numai umbra, putem să ne facem o idee despre ce înseamnă asta şi să înţelegem motivaţia lui Susskind şi 't Hooft gândindu-ne la entropia găurii negre, aşa cum am prezentat-o în capitolul 13. Amintiţi-vă că entropia găurii negre este determinată de aria suprafeţei orizontului evenimentelor – şi nu de tot volumul spaţiului mărginit de orizontul evenimentelor. Prin urmare, dezordinea unei găuri negre, şi în mod corespunzător informaţia pe care aceasta o conţine, este codificată în datele bidimensionale ale ariei suprafeţei. Este ca şi cum orizontul evenimentelor unei găuri negre ar acţiona ca o hologramă, captând tot conţinutul de informaţii al interiorului tridimensional al găurii negre. Susskind şi 't Hooft au generalizat această idee la întregul univers, sugerând că tot ce se întâmplă în „interiorul" universului este doar o reflexie a datelor şi a ecuaţiilor definite pe o frontieră îndepărtată. Recent, cercetări ale lui Juan Maldacena, Edward Witten, Steven Gubster, Igor Klebanov şi Alexander Poliakov au arătat că, cel puţin în anumite cazuri, *teoria corzilor încorporează principiul holografic*. Într-o manieră care este în momentul de faţă intens cercetată, se pare că fizica universului guvernat de teoria corzilor are o descriere echivalentă care implică numai

fizica de pe o asemenea suprafaţă care mărgineşte universul – o suprafaţă care este în mod necesar de dimensiune mai mică decât interiorul. Unii teoreticieni ai corzilor au sugerat că înţelegerea completă a principiului holografic şi a rolului său în teoria corzilor s-ar putea să ducă la cea de-a treia revoluţie a supercorzilor.

140 *Sir Isaac Newton's Mathematical Principles of Natural Philosophy and His System of the Worlds*, traducere de Motte şi Cajori (Berkeley: University of California Press, 1962), vol. 1, p. 6.

141 Dacă aveţi cunoştinţe de algebră liniară, un mod simplu de a privi geometria necomutativă presupune înlocuirea coordonatelor carteziene convenţionale, care comută la înmulţire, cu matrice, care nu comută.

142 Interviu cu Cumrun Vafa, 12 ianuarie, 1998.

143 Interviu cu Edward Witten, 11 mai, 1998.

144 Citat în *Albert Einstein, Creator and Rebel* de Banesh Hoffman şi Helen Dukas (New York: Viking, 1972), p. 18.

145 Martin J. Klein, „Einstein: The Life and Times, de R. W. Clark" (comentariu asupra cărţii), *Science* 174, pp. 1315-1316.

146 Jacob Bronowski, *The Ascent of Man* (Boston: Little, Brown, 1973), p. 20.

Glosar de termeni științifici

A doua revoluție a teoriei supercorzilor. Perioadă în dezvoltarea teoriei corzilor, inaugurată în 1995, în care au început să fie înțelese anumite aspecte neperturbative ale teoriei.

Abordare perturbativă, Metodă perturbativă. Vezi teoria perturbațiilor.

Accelerator de particule. Dispozitiv experimental care accelerează particulele până aproape de viteza luminii și apoi le ciocnește una de alta, cu scopul de a sonda structura materiei.

Accelerație. Schimbarea vitezei sau a direcției de deplasare a obiectului.

Amplitudine. Înălțimea maximă a crestei unei unde sau adâncimea maximă a văii.

Antimaterie. Materie care are aceleași proprietăți gravitaționale ca și materia obișnuită, dar are sarcină electrică opusă și sarcini de forță nucleară opuse.

Antiparticulă. Particulă de antimaterie.

Atom. Constituent fundamental al materiei, constând dintr-un nucleu (care este format la rândul lui din protoni și neutroni) și un roi de electroni care orbitează în jurul lui.

Boson. Particulă, sau mod de vibrație al corzii, al cărui spin este un număr întreg; particulă mesager.

Boson de etalonare slabă. Cel mai mic pachet de câmp de forță slabă; particula mesager a forței slabe; numit boson W sau boson Z.

Brană. Oricare dintre obiectele extinse care apar în teoria corzilor. O 1-brană este o coardă, o 2-brană este o membrană, o 3-brană are trei dimensiuni extinse etc. În general, o p-brană are p dimensiuni spațiale.

Câmp, Câmp de forțe. Din perspectivă macroscopică, mijlocul prin care o forță își comunică influența; este descris în fiecare punct din spațiu printr-un set de numere care reflectă intensitatea și direcția forței în punctul respectiv.

Câmp electromagnetic. Câmpul de forță al forței electromagnetice, constând din linii de forță electrice și magnetice în fiecare punct din spațiu.

Ceasul cu lumină. Ceas ipotetic care măsoară timpul scurs prin numărarea drumurilor dus-întors ale unui singur foton între două oglinzi.

Chiral, Chiralitate. Caracteristică a fizicii particulelor fundamentale care distinge între stânga şi dreapta, aratând că universul nu este perfect simetric stânga-dreapta.

Claustrofobie cuantică. Vezi fluctuaţii cuantice.

Coardă. Obiect fundamental unidimensional, ingredientul esenţial al teoriei corzilor.

Coardă deschisă. Tip de coardă cu două capete libere.

Coardă închisă. Tip de coardă de forma unei bucle.

Condiţii iniţiale. Date care descriu starea iniţială a unui sistem fizic.

Constanta cosmologică. O modificare a ecuaţiilor iniţiale ale relativităţii generale pentru a permite existenţa unui univers static; interpretabilă ca o densitate de energie constantă a vidului.

Constanta de cuplaj a corzilor. Număr (pozitiv) care determină cât de probabil este ca o coardă să se desfacă în două corzi ori ca două corzi să se unească într-una singură – procesele elementare din teoria corzilor. Fiecare teorie a corzilor are propria ei constantă de cuplaj, a cărei valoare trebuie determinată de o ecuaţie; în momentul de faţă aceste ecuaţii nu sunt suficient de bine înţelese pentru a oferi toate informaţiile utile. Constante de cuplaj mai mici decât 1 fac ca metodele perturbative să fie aplicabile.

Constanta lui Planck. Notată prin h, constanta Planck este un parametru fundamental al mecanicii cuantice. Determină mărimea unităţilor discrete de energie, masă, spin etc. în care este împărţită lumea microscopică. Valoarea ei este de $1{,}05 \times 10^{-27}$ grame-centimetru/secundă.

Contracţia Lorentz. Trăsătură a relativităţii speciale prin care un obiect aflat în mişcare pare mai scurt de-a lungul direcţiei de mişcare.

Cromodinamică cuantică (QCD de la *Quantum chromodynamics*). Teorie cuantică de câmp relativistă a forţei tari şi a cuarcilor care încorporează relativitatea specială.

Cuantă. Cea mai mică unitate fizică în care ceva poate fi divizat conform legilor mecanicii cuantice. De exemplu, fotonii sunt cuantele câmpului electromagnetic.

Cuarc. Particulă asupra căreia acţionează forţa tare. Cuarcii există în şase tipuri (up, down, charm, strange, top, bottom – sus, jos, farmec, straniu, vârf, bază) şi trei culori (roşu, verde, albastru).

Cuplaj slab. Teorie în care constanta de cuplaj a corzilor este mai mică decât 1.

Cuplaj tare. Teorie în care constanta de cuplaj a corzilor este mai mare decât 1.

Curbură. Abaterea unui obiect, a spaţiului sau a spaţiului-timp de la forma plată, deci de la regulile geometriei euclidiene.

Determinism cuantic. Proprietate a mecanicii cunatice conform căreia cunoaşterea stării cuantice a unui sistem la un anumit moment de timp determină complet starea acestuia la orice moment din trecut sau din viitor. Cunoaşterea stării cuantice determină însă numai probabilitatea ca un viitor sau altul să se înfăptuiască.

Determinismul laplacean. Ideea că universul e un mecanism în care cunoaşterea completă a stării universului la un anumit moment determină complet starea acestuia la toate momentele din trecut şi din viitor.

Dilatarea timpului. Trăsătură a relativității speciale, conform căreia scurgerea timpului este încetinită pentru un observator aflat în mișcare.

Dimensiune. Axă sau direcție independentă a spațiului sau a spațiului-timp. Spațiul care ne înconjoară are trei dimensiuni (stânga-dreapta, înainte-înapoi, sus-jos), iar spațiul-timp are patru (cele trei axe menționate, plus axa trecut-viitor). Teoria supercorzilor cere ca universul să aibă dimensiuni spațiale suplimentare.

Dimensiune extinsă. Dimensiune spațială (sau spațio-temporală) care este mare și direct observabilă; dimensiune cu care suntem obișnuiți, spre deosebire de dimensiunile încolăcite.

Dimensiune încolăcită. Dimensiune spațială care nu are o extindere suficient de mare pentru a fi observabilă; dimensiune spațială încolăcită și închisă pe o distanță minusculă, ceea ce face imposibilă observarea ei directă.

Dual, Dualitate, Simetrii duale. Situații în care două sau mai multe teorii par să fie complet diferite, dar au consecințe fizice identice.

Dualitatea undă-corpuscul. Trăsătură fundamentală a mecanicii cuantice conform căreia obiectele prezintă atât caracteristici ondulatorii, cât și caracteristici corpusculare.

Dualitatea tare-slab. Situație în care o teorie cuplată tare este duală – identică din punct de vedere fizic – cu o teorie diferită, cuplată slab.

Ecuația Klein-Gordon. Ecuație fundamentală a teoriei cuantice de câmp relativiste.

Ecuația Schrödinger. Ecuație care guvernează evoluția undelor de probabilitate în mecanica cuantică.

Efect fotoelectric. Fenomenul de emisie a electronilor de pe suprafața unui metal pe care este proiectat un fascicul de lumină.

Electrodinamica cuantică (QED – de la *Quantum Electrodynamics*). Teoria cuantică de câmp relativistă a forței electromagnetice și a electronilor, care încorporează relativitatea specială.

Electron. Particulă cu sarcină negativă; orbitează în jurul nucleului atomic.

Energia de înfășurare. Energia înmagazinată de o coardă înfășurată în jurul unei *dimensiuni* circulare a spațiului.

Energia Planck. Aproximativ 1000 de kilowați-oră. Energia necesară pentru a sonda distanțe de ordinul lungimii Planck. Energia tipică de vibrație a unei corzi în teoria corzilor.

Entropia găurii negre. Entropia înmagazinată într-o gaură neagră.

Entropie. Măsură a dezordinii dintr-un sistem fizic; numărul de rearanjări ale ingredientelor unui sistem care lasă aparența de ansamblu neschimbată.

Familii. Organizarea particulelor de materie în trei grupe, fiecare constituind o familie. Particulele dintr-o familie diferă de particulele din familia precedentă prin aceea că sunt mai grele, dar transportă aceleași sarcini electrice și aceleași sarcini de forță nucleară.

Fază. Când se referă la materie, reprezintă stările posibile ale acesteia: starea solidă, starea lichidă, starea gazoasă. Mai general, se referă la descrierile posibile ale unui sistem fizic, pe măsură ce anumite caracteristici ale acestuia se modifică

(cum ar fi temperatura, valoarea constantei de cuplaj a corzilor, forma spațiului-timp etc.)

Fermion. Particulă sau mod de vibrație a corzii cu spinul număr semiîntreg; particulă de materie.

Figură de interferență. Configurație care apare din suprapunerea și amestecarea undelor emise din locuri diferite.

Fluctuație cuantică. Comportare turbulentă a unui sistem la scară microscopică datorată principiului de incertitudine.

Foaie de univers. Suprafața bidimensională măturată de o coardă în timpul mișcării sale.

Foton. Cel mai mic pachet al câmpului de forță electromagnetică; particulă mesager a forței electromagnetice; cantitatea cea mai mică de lumină.

Forța electromagnetică. Una din cele patru forțe fundamentale, unificarea forțelor electrică și magnetică.

Forța gravitațională. Cea mai slabă dintre cele patru forțe fundamentale ale naturii. A fost descrisă mai întâi de teoria universală a gravitației a lui Newton, apoi de teoria generală a relativității a lui Einstein.

Forța slabă, Forța nucleară slabă. Una din cele patru forțe fundamentale, responsabilă pentru dezintegrarea radioactivă.

Forța tare, forța nucleară. Cea mai puternică din cele patru forțe fundamentale, responsabilă pentru menținerea cuarcilor în interiorul protonilor și neutronilor, precum și pentru menținerea protonilor și neutronilor înghesuiți în nucleele atomice.

Frecvență. Numărul de cicluri oscilatorii complete pe care o undă le face în fiecare secundă.

Funcție de undă. Undele de probabilitate pe care se bazează mecanica cuantică.

Gaură de vierme. Regiune tubulară a spațiului care conectează o regiune a universului cu alta.

Gaură multidimensională. O generalizare a găurii de covrig la mai multe dimensiuni.

Gaură neagră. Obiect al cărui câmp gravitațional imens capturează absolut tot ce se apropie de el (depășește orizontul evenimentelor), inclusiv lumina.

Gaură neagră extremă. Gaură neagră care conține cea mai mare cantitate de sarcină de forță pentru o masă totală dată.

Gaură neagră fără masă. Tip particular de gaură neagră întâlnit în teoria corzilor, care poate avea inițial o masă mare, dar devine din ce în ce mai ușoară pe măsură ce o porțiune de spațiu Calabi-Yau se restrânge. Când acea porțiune de spațiu s-a restrâns la un punct, gaura neagră, inițial masivă, rămâne fără masă. În această stare nu mai prezintă trăsăturile obișnuite ale unei găuri negre, cum ar fi un orizont al evenimentelor.

Geometrie cuantică. Modificare a geometriei riemanniene necesară pentru o descriere corectă a fizicii spațiului la scări ultramicroscopice, unde efectele cuantice devin importante.

Geometrie riemanniană. Cadru matematic pentru descrierea formelor curbate cu un număr oarecare de dimensiuni. Joacă un rol central în descrierea spațiului-timp din relativitatea generală a lui Einstein.

Gluon. Cantitatea cea mai mică a câmpului de forță tare; particula mesager a forței tari.

Gravitație cuantică. Teorie care unifică mecanica cuantică și relativitatea generală și care poate implica modificări într-una sau în ambele teorii.

Graviton. Cantitatea cea mai mică a câmpului forței gravitaționale; particula mesager a câmpului gravitațional.

Infiniți. Rezultate fără sens care apar în calcule ce implică relativitatea generală și mecanica cuantică într-un cadru care consideră particulele punctiforme.

Inflație, Cosmologie inflaționară. Modificarea cosmologiei standard a big bang-ului în privința momentelor de început, conform căreia universul trece printr-o perioadă scurtă de expansiune enormă.

Kelvin. Scară de temperaturi 10^{-33} care se raportează la temperatura de zero absolut.

Legile de mișcare ale lui Newton. Legi care descriu mișcarea corpurilor pornind de la concepte absolute și imuabile ale spațiului și timpului; aceste legi au fost considerate valabile până la descoperirea relativității speciale de către Einstein.

Lungime de undă. Distanța dintre crestele sau văile succesive ale unei unde.

Lungimea Planck. Aproximativ 10^{-33} centimetri. Scară de distanțe sub care *fluctuațiile cuantice* ale structurii *spațio-temporale* ar deveni enorme. Mărimea unei *corzi* tipice în *teoria corzilor*.

Macroscopic. Se referă la scări de distanțe întâlnite în mod obișnuit în viața de zi cu zi sau scări mai mari decât acestea; pe scurt, opus conceptului de microscopic.

Marea explozie (big bang). Teoria acceptată în ziua de astăzi, conform căreia universul a luat naștere cu aproximativ 15 miliarde de ani în urmă dintr-o stare de energie, densitate și comprimare enorme.

Marea implozie (big crunch). Una din ipotezele legate de viitorul universului, conform căreia expansiunea din momentul de față se va opri, se va inversa și va duce la un colaps al materiei și al spațiului; inversul marii explozii.

Marea unificare. Clasă de teorii care unesc cele trei forțe negravitaționale într-un singur formalism teoretic.

Masa Planck. Aproximativ zece miliarde de miliarde de mase protonice; aproximativ a suta mia parte dintr-un gram; aproximativ masa unui mic fir de praf. Echivalentul în masă al unei corzi vibrante tipice din teoria corzilor.

Mecanica cuantică. Ansamblu al legilor care guvernează universul; trăsăturile sale neobișnuite cum ar fi incertitudinea, fluctuațiile cuantice și dualismul undă-corpuscul devin vizibile la scara microscopică a atomilor și a particulelor subnucleare.

Mod al corzii. Configurație (de vibrație, de înfășurare) pe care o poate lua o coardă.

Mod de înfășurare. Configurație a unei corzi înfășurată în jurul unei dimensiuni spațiale circulare.

Mod de vibrație. Numărul de creste și văi, precum și amplitudinea oscilațiilor unei corzi.

Modelul cosmologic standard. Teoria marii explozii, împreună cu înțelegerea celor trei forțe negravitaționale așa cum apare ea în modelul standard al fizicii particulelor.

Modelul standard al fizicii particulelor, Modelul standard, Teoria standard. O teorie a celor trei forțe negravitaționale și a acțiunii acestora asupra materiei, care se bucură de un succes imens. Reprezintă unificarea cromodinamicii cuantice cu teoria electroslabă.

Modelul standard supersimetric. Generalizare a modelului standard al particulelor care încorporează supersimetria. Presupune dublarea numărului de specii de particule elementare cunoscute nouă.

Multi-covrig, Covrig multiplu. Generalizare a formei de covrig (tor) care are mai multe găuri.

Multivers. Ipotetică lărgire a cosmosului, în care universul nostru este numai unul dintr-un număr enorm de universuri distincte și separate.

Neperturbativă. Trăsătură a unei teorii a cărei valabilitate nu depinde de calcule aproximative, perturbative; trăsătură exactă a teoriei.

Neted, Spațiu neted. Regiune spațială în care textura spațiului este plată sau ușor curbată, fără gâtuiri sau rupturi.

Neutrin. Particulă neutră din punct de vedere electric care interacționează numai prin forța slabă.

Neutron. Particulă neutră din punct de vedere electric, constituent tipic al nucleului atomic; este format din trei cuarci (doi cuarci down și un cuarc up).

Nucleosinteza primordială. Producerea de nuclee atomice în primele trei minute după big bang.

Nucleu. Miezul unui atom care constă din protoni și neutroni.

Număr de înfășurare. De câte ori este înfășurată o coardă în jurul unei dimensiuni spațiale circulare.

Număr de vibrație. Număr întreg care descrie energia în mișcarea de vibrație uniformă a unei corzi; energia mișcării sale de ansamblu, spre deosebire de mișcarea în care coarda își schimbă forma.

Observator. Persoană idealizată sau instrument de măsură, de cele mai multe ori ipotetic, care măsoară anumite proprietăți relevante ale sistemului.

Orizontul evenimentelor. Suprafața cu sens unic a unei găuri negre; odată depășită, legile gravitației fac să nu mai existe cale de întoarcere, nimic nu poate scăpa de atracția gravitațională a găurii negre.

Particulă mesager. Cea mai mică cantitate a unui câmp de forță; purtătorul microscopic al forței.

Particule virtuale. Particule care apar pentru scurt timp în vid; ele există datorită energiei împrumutate conform principiului de incertitudine și se anihilează apoi rapid, restituind energia împrumutată.

Plat. Supus regulilor geometriei euclidiene; o formă precum suprafața unei mese perfect netede sau o generalizare a acesteia în mai multe dimensiuni.

Principiul al doilea al termodinamicii. Principiu care afirmă că entropia totală crește întotdeauna.

Principiul antropic. Doctrină care explică proprietățile universului prin faptul că, dacă acestea ar fi fost diferite, atunci ar fi fost foarte improbabil ca viața să apară, deci oricum noi nu am putea observa alte proprietăți.

Principiul de incertitudine. Principiu al mecanicii cuantice descoperit de Heisenberg, conform căruia există caracteristici ale universului, cum ar fi poziția și viteza unei particule, care nu pot fi cunoscute simultan cu precizie absolută. Asemenea aspecte incerte ale lumii microscopice devin din ce în ce mai pregnante pe măsură ce distanțele și intervalele de timp considerate devin mai scurte. Particulele și câmpurile oscilează și sar la orice valoare compatibilă cu principiul de incertitudine. Aceasta înseamnă că lumea microscopică este o agitație frematătoare scufundată în marea violentă a fluctuațiilor cuantice.

Principiul echivalenței. Principiul central al relativității generale care afirmă indiscernabilitatea dintre mișcarea accelerată și imersarea într-un câmp gravitațional (în regiuni de observație suficient de mici). Generalizează principiul relativității arătând că toți observatorii, indiferent de starea lor de mișcare, pot pretinde că se află în repaus, atât timp cât acceptă prezența unui câmp gravitațional corespunzător.

Principiul relativității. Principiul central al relativității speciale care afirmă că toți observatorii care se mișcă cu viteză constantă sunt supuși acelorași legi fizice și prin urmare orice orice observator care se deplasează cu viteză constantă este îndreptățit să susțină că se află în repaus.

Problema orizontului. Problemă cosmologică legată de faptul că regiuni ale universului separate prin distanțe imense au proprietăți aproape identice, cum ar fi temperatura. Cosmologia inflaționară oferă o soluție.

Proces cu o singură buclă. Contribuție la un calcul de teoria perturbațiilor în care este implicată o pereche virtuală de corzi (sau de particule, în teorii bazate pe particule punctiforme).

Proton. Particulă încărcată pozitiv, constituent tipic al nucleului atomic; constă din trei cuarci (doi cuarci up și un cuarc down).

Radiația cosmică de fond. Radiație în domeniul microundelor care umple universul; a fost produsă în timpul marii explozii, iar apoi s-a rarefiat și s-a răcit pe măsură ce universul s-a extins.

Radiație. Energia transportată de unde sau particule.

Radiație electromagnetică. Energia transportată de o undă electromagnetică.

Relativitatea generală. Formulare a legilor gravitației dată de Einstein, care arată că spațiul și timpul transmit forța gravitațională prin curbarea lor.

Relativitatea specială. Legile lui Einstein privind spațiul și timpul în absența gravitației.

Rezonanță. Una din stările naturale de oscilație ale unui sistem fizic.

Ruperea simetriei. Reducerea simetriei unui sistem, asociată de regulă cu o tranziție de fază.

Sarcină de forță. Proprietate a unei particule care determină răspunsul acesteia la un anumit tip de forță. De exemplu, sarcina electrică a unei particule determină răspunsul ei la forța electromagnetică.

Sferă. Suprafața exterioară a unei mingi. Suprafața unei mingi tridimensionale obișnuite are două dimensiuni (care pot fi indexate prin două numere, de exemplu „latitudinea" și „longitudinea" pe suprafața Pământului). Mai general, conceptul de sferă se poate aplica la mingi – și deci la suprafețele lor – într-un număr oarecare de dimensiuni. O sferă unidimensională este o denumire mai pretențioasă pentru cerc; o sferă zero-dimensională înseamnă două puncte (așa cum e explicat în text). O sferă tridimensională este mai greu de imaginat; este suprafața unei mingi cvadridimensionale.

Simetria de etalonare slabă. Simetrie de etalonare care stă la baza forței slabe.

Simetria forței tari. Simetrie de etalonare care stă la baza forței tari; asociată cu invarianța sistemului fizic la transformări ale culorii cuarcilor.

Simetrie. Proprietate a unui sistem fizic care nu se schimbă atunci când sistemul suferă o anume transformare. De exemplu, o sferă este simetrică la rotații, din moment ce arată la fel indiferent cum e rotită.

Simetrie de etalonare. Principiu de simetrie care stă la baza descrierii cuantice a celor trei forțe negravitaționale; simetria implică invarianța sistemului fizic la diverse transformări ale valorilor sarcilor de forță, transformări care pot diferi de la un loc la altul și de la un moment de timp la altul.

Simetrie de etalonare electromagnetică. Simetria de etalonare care stă la baza electrodinamicii cuantice.

Simetrie în oglindă. Simetrie din contextul teoriei corzilor, conform căreia două forme Calabi-Yau diferite, numite perechi în oglindă, duc la aceeași fizică atunci când sunt alese să reprezinte dimensiunile încolăcite ale teoriei corzilor.

Singularitate. Loc în care structura spațiului sau a spațiului-timp suferă o ruptură devastatoare.

Soluția Schwarzchild. Soluție a ecuațiilor relativității generale pentru o distribuție sferică de materie; una din aceste soluții este existența găurilor negre.

Spațiu Calabi-Yau, Formă Calabi-Yau. Un spațiu (formă) în care dimensiunile spațiale suplimentare cerute de teoria corzilor pot fi încolăcite în conformitate cu ecuațiilor teoriei.

Spațiu-timp. Unificare a spațiului și timpului apărută inițial în relativitatea restrânsă. Poate fi considerat materialul din care este croit universul; constituie arena dinamică în care se desfășoară evenimentele universului.

Spin. Versiune cuantică a noțiunii familiare de rotație; particulele au o anumită cantitate de rotație intrinsecă, deci de spin, care este fie un număr întreg, fie un număr semiîntreg (în multipli ai constantei lui Planck) și care nu se schimbă niciodată.

Spumă spațio-temporală. Caracterul tumultuos, clocotitor al materialului spațiului-timp la scări ultramicroscopice, conform perspectivei convenționale

bazată pe particule punctiforme. Unul dintre motivele esențiale de incompatibilitate între mecanica cuantică și relativitatea generală înainte de teoria corzilor.

Stări BPS. Configurații într-o teorie supersimetrică ale căror proprietăți pot fi determinate exact prin deducții întemeiate pe simetrii.

Sumă după drumuri. Formulare a mecanicii cuantice în care se presupune că particulele se deplasează de la un punct la altul prin parcurgerea tuturor traiectoriilor posibile dintre puncte.

Supergravitația în mai multe dimensiuni. Clasă de teorii ale supergravitației în mai mult de patru dimensiuni spațio-temporale.

Supergravitația în unsprezece dimensiuni. Teorie promițătoare a supergravitației în mai multe dimensiuni, elaborată în anii 1970, apoi ignorată, pentru ca recent să se demonstreze că este o parte importantă a teoriei corzilor.

Supergravitație. Clasă de teorii bazate pe particule punctiforme care combină relativitatea generală cu supersimetria.

Superparteneri. Particule ai căror spini diferă prin jumătate de unitate și care sunt împerecheate prin supersimetrie.

Supersimetrie. Principiu de simetrie care leagă proprietățile particulelor cu spin egal cu un număr întreg de unități (bosoni) cu proprietățile particulelor care au spinul un număr semiîntreg de unități (fermioni).

Tahion. Particulă a cărei masă (la pătrat) este negativă; prezența acestei particule într-o teorie conduce în general la contradicții.

Tensiunea Planck. Aproximativ 10^{39} tone. Tensiunea dintr-o coardă tipică în teoria corzilor.

Teoria corzilor. Teorie unificată despre univers, care postulează că ingredientele fundamentale ale naturii nu sunt particule zero-dimensionale, ci filamente unidimensionale numite corzi. Teoria corzilor unește în mod armonios mecanica cuantică și relativitatea generală, care înainte fixau, în mod separat, legile care guvernează corpurile mici și corpurile mari și care altminteri sunt incompatibile. De mult ori se folosește ca prescurtare pentru teoria supercorzilor.

Teoria corzilor bosonice. Prima teorie a corzilor; conține moduri de vibrație care sunt toate bosoni.

Teoria corzilor de Tipul I. Una din cele cinci teorii ale supercorzilor; implică atât corzi închise, cât și corzi deschise.

Teoria corzilor de Tipul IIA. Una din cele cinci teorii ale supercorzilor; implică corzi închise, cu moduri de vibrație simetrice stânga-dreapta.

Teoria corzilor de Tipul IIB. Una din cele cinci teorii ale supercorzilor; implică corzi închise, cu moduri de vibrație simetrice stânga-dreapta.

Teoria corzilor Heterotice-E (Teoria corzilor Heterotice E8×E8). Una din cele cinci teorii ale supercorzilor; implică corzi închise ale căror vibrații care se deplasează spre dreapta seamănă cu cele ale corzilor de Tipul II și ale căror vibrații care se deplasează spre stânga implică vibrații ale corzii bosonice. Diferă în unele privințe importante dar subtile de Teoria corzilor Heterotice-O.

Teoria corzilor Heterotice-O (Teoria corzilor Heterotice O(32)). Una din cele cinci teorii ale supercorzilor; implică corzi închise ale căror vibrații către dreapta seamănă cu cele ale corzilor de Tipul II și ale căror vibrații către stânga implică vibrații ale corzii bosonice. Diferă în unele privințe importante, dar subtile de Teoria corzilor Heterotic-E.

Teoria despre tot (T. O. E. – de la *Theory of everything*). Teorie cuantică ce încorporează toate forțele și toată materia.

Teoria electroslabă. Teorie cuantică de câmp relativistă care descrie forța slabă și forța electromagnetică într-o formă unificată.

Teoria lui Maxwell, Teoria electromagnetismului. Teorie care unifică electricitatea și magnetismul pe baza conceptului de câmp electromagnetic, elaborată de Maxwell în anii 1880; arată că lumina vizibilă este un exemplu de undă electromagnetică.

Teoria M. Teorie apărută în urma celei de-a doua revoluții din teoria supercorzilor și care unește cele cinci teorii ale supercorzilor într-un singur formalism atotcuprinzător. Teoria M pare să fie o teorie care implică unsprezece dimensiuni spațio-temporale, dar multe din proprietățile ei sunt încă neînțelese.

Teoria perturbațiilor. Formalism de simplificare a unei probleme dificile prin găsirea unei soluții aproximative care este apoi rafinată, pe măsură ce mai multe detalii, inițial ignorate, sunt introduse sistematic în calcul.

Teoria supercorzilor. Teorie a corzilor care încorporează supersimetria.

Teoria newtoniană a gravitației. Teorie a gravitației care afirmă că forța de atracție dintre două corpuri este proporțională cu masele lor și invers proporțională cu pătratul distanței dintre ele. Această teorie a fost înlocuită mai târziu de relativitatea generală a lui Einstein.

Teorie cuantică de câmp relativistă. Teorie cuantică a câmpurilor, cum ar fi câmpul electromagnetic, care încorporează relativitatea specială.

Teorie cuantică de câmp supersimetrică. Teorie cuantică de câmp care încorporează supersimetria.

Teorie Kaluza-Klein. Clasă de teorii care încorporează dimensiuni încolăcite suplimentare, precum și mecanica cuantică.

Teorie unificată, Teorie de câmp unificată. Orice teorie care descrie toate cele patru forțe și toată materia într-un singur și atotcuprinzător formalism.

Termodinamică. Legi formulate în secolul XIX pentru a descrie aspecte ale căldurii, lucrului mecanic, energiei, entropiei, precum și evoluția lor corelată într-un sistem fizic.

Timpul Planck. Aproximativ 10^{-43} secunde. Moment de timp la care dimensiunea universului era aproximativ egală cu lungimea Planck; mai exact, este timpul necesar luminii pentru a străbate o distanță egală cu lungimea Planck.

Topologic distincte. Două forme care nu pot fi transformate una într-alta printr-o deformare care să nu implice rupturi de vreun fel.

Topologie. Clasificare a formelor în grupuri așa încât formele dintr-un grup să poată fi deformate unele într-altele fără a le smulge sau rupe structura în vreun fel.

Tor. Suprafaţa bidimensională a unui covrig.

Tranziţie conică. Evoluţia unei porţiuni dintr-un spaţiu Calabi-Yau în care spaţiul se rupe şi apoi se repară, dar care are totuşi consecinţe fizice blânde şi acceptabile în contextul teoriei corzilor. Rupturile care au loc sunt mai grave decât cele din tranziţiile cu inversie.

Tranziţie cu inversie. Evoluţia unei porţiuni dintr-un spaţiu Calabi-Yau în care spaţiul se rupe şi apoi se repară singur, având totuşi consecinţe fizice blânde şi acceptabile în contextul teoriei corzilor.

Tranziţie cu schimbarea topologiei. Evoluţie a texturii spaţiului care implică rupturi, deci din care rezultă o schimbare de topologie a spaţiului.

Tranziţie de fază. Evoluţia unui sistem fizic de la o fază la alta.

Tunelare cuantică. Trăsătură a mecanicii cuantice care arată că obiectele pot trece prin bariere care ar fi impenetrabile conform legilor clasice ale lui Newton.

Ultramicroscopice. Scări de lungimi mai mici decât lungimea Planck (şi, de asemenea, intervale de timp mai scurte decât timpul Planck).

Undă electromagnetică. Perturbaţie ondulatorie într-un câmp electromagnetic; toate undele electromagnetice se deplasează cu viteza luminii. Exemple de unde electromagnetice sunt lumina vizibilă, razele X, microundele şi radiaţia infraroşie.

Vibraţie uniformă. Mişcarea de ansamblu a unei corzi în cursul căreia coarda nu îşi schimbă forma.

Zero absolut. Temperatura cea mai joasă posibilă, aproximativ –273 grade Celsius, sau 0 grade pe scara Kelvin.

Cuprins

Redactor
VLAD ZOGRAFI
Tehnoredactor
LUMINIȚA SIMIONESCU
Corector
MARILENA BĂLĂȘEL
DTP
STELIAN BIGAN
CORNEL DRĂGHIA

Apărut 2008
BUCUREȘTI – ROMÂNIA

Lucrare executată la C.N.I. „CORESI“ S.A.

Visul dintotdeauna al fizicienilor a fost găsirea unei teorii ultime care să explice toate fenomenele din univers într-un cadru unitar și elegant. Până de curând însă, microcosmosul (descris de mecanica cuantică) și macrocosmosul (descris de relativitatea generală) păreau imposibil de adus la un numitor comun. În ultimele decenii a apărut totuși un candidat redutabil la titlul de teorie ultimă: teoria corzilor. Ea presupune o regândire radicală a noțiunilor de spațiu, timp și particulă, și chiar a ideilor pe care se întemeiază cunoașterea științifică.

Universul elegant e prima carte în limba română care oferă o prezentare sistematică, limpede și intuitivă a teoriei corzilor. Brian Greene, el însuși fizician de vârf cu contribuții importante în domeniu, reușește aici marea performanță de a face accesibile publicului larg, fără nici o pregătire științifică, cercetări de ultimă oră și idei pe cât de abstracte, pe atât de tulburătoare ce par să conducă spre teoria ultimă. *Universul elegant*, nominalizată la premiul Pulitzer, este probabil cea mai citită carte de știință apărută în anii din urmă.

ISBN 978-973-50-1980-8

